N° d'ordre 2

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ

DE BESANÇON

pour obtenir

le titre de DOCTEUR de TROISIÈME CYCLE

(Spécialité : MÉTROLOGIE)

par

Claude COROTTE

Licencié ès-Sciences

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES CONCERNANT LE PENDULE DE TORSION

Soutenue le 5 Juin 1964, devant la Commission d'Examen

MM. P. MESNAGE — Président

F. CHATELET
R. CHALEAT
P. M. DUFFIEUX — Examinateurs

N° d'ordre 2

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ

DE BESANÇON

pour obtenir

le titre de DOCTEUR de TROISIÈME CYCLE

(Spécialité : MÉTROLOGIE)

par

Claude COROTTE

Licencié ès-Sciences

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES CONCERNANT LE PENDULE DE TORSION

Soutenue le 5 Juin 1964, devant la Commission d'Examen

MM. P. MESNAGE — Président

F. CHATELET, R. CHALEAT, P. M. DUFFIEUX — Examinateurs

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547626_0027

UNIVERSITE DE BESANCON

FACULTE DES SCIENCES

Doyen Honoraire : M. GLANGEAUD

Professeurs Honoraires : MM. BAILLAUD.R , TOURNEUX, TRILLAT, VINCENSINI

Maître de conférences Honoraire : M. GRANIER

DOYEN :	M.	JACQUEMAIN	: Chimie Appliquée
ASSESSEUR :	M.	MESNAGE	: Chronométrie
PROFESSEURS :	MM.	TRONCHET	: Botanique
		CHATELET	: Mathématiques
		PERROT	: Chimie générale
		DREYFUSS	: Géologie-Minéralogie
		THEOBALD	: Paléontologie et géologie stratigraph
		CROISOT	: Méthodes mathématiques de la Physique
		DELHAYE	: Astronomie
		QUANTIN	: Botanique
		CHALEAT	: Mécanique Appliquée
		RIPPLINGER	: Physiologie animale
		NAHON	: Mécanique générale
		BERNARD	: Chimie-physique
		RIGAL	: Calcul numérique
	Mde	ROZIS	: Physique
		THIEBAUT	: Géologie-Minéralogie

PROFESSEURS SANS CHAIRE :

	MM.	DEVIN	: Chimie Générale
		POTIER	: Physique des Solides
		GOMOT	: Zoologie

MAITRES DE CONFERENCES :

	MM.	VALLEE	: Mathématiques appliquées
		VIENOT	: Physique
		MOTCHANE	: Electronique
		REAL	: Zoologie
		GOUARNE	: Mathématiques
	Mle	LEGRAND	: Botanique
		THEOBALD.J	: Physique P.C.B - S.P.C.N
		REMOND	: Chargé d'Enseignement de la Maîtrise de Conférences de Chronométrie

CONSEILLER ADMINISTRATIF UNIVERSITAIRE :

M. LAMBERT

ETUDES EXPERIMENTALES

CONCERNANT

LE PENDULE DE TORSION

INTRODUCTION

L'étude proposée par Monsieur MESNAGE, avait dans sa formulation première un but assez ambitieux, puisqu'il s'agissait de reprendre, en essayant d'améliorer la précision des mesures, des expériences effectuées par Monsieur JAQUEROD au Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères, concernant le comportement d'un fil à la torsion, et de les compléter en cherchant l'influence que pouvait avoir la traction axiale sur le couple de torsion, influence que la théorie classique selon de Saint Venant ne fait pas intervenir. Les mesures devaient en premier lieu vérifier si la théorie proposée par Monsieur CHALEAT, faisant encore appel à la loi de HOOKE, mais ne considérant plus que les centres de gravité des sections droites restent à distance invariable les uns des autres au cours de la torsion, donnait des résultats compatibles avec les observations. Dans le cas contraire il resterait à élaborer une nouvelle théorie. On espérait aussi tirer de ces mesures d'utiles renseignements concernant l'élasticité (variation du module de Coulomb, frottement interne). Le programme était séduisant et rentrait admirablement dans le cadre d'un troisième cycle de métrologie.

Cette étude avait déjà été abordée par un élève de l'Institut de Chronométrie, mais si malheureusement l'imprécision des mesures ne permettait pas de tirer des conclusions, elle avait cependant le mérite de préciser une méthode, et d'attirer l'attention sur les difficultés rencontrées.

La réalisation d'un nouvel ensemble, n'ayant pas apporté les résultats excomptés, il restait à déterminer les causes de l'imprécision constatée. Cette dernière était-elle liée au système de mesure, ou au contraire à l'oscillateur ? Une méthode permettant de vérifier le système de mesure m'a permis de conclure que l'imprécision était liée à l'oscillateur. L'influence des chocs, de la température, de la pression sur le pendule de torsion a été étudiée par mon collègue et ami Gérard LALLEMENT qui a présenté ses résultats dans sa thèse d'ingénieur-docteur. Ces études nous ont imposé de limiter nos ambitions premières et de restreindre le domaine d'application des méthodes chronométriques.

L'amortissement faible du pendule de torsion conduit pour le tracé des courbes amplitude-période à des mesures longues fastidieuses et inconfortables (local plus ou moins isotherme, et par suite plus ou moins bien aéré). Si le relevé des paramètres pouvait se faire automatiquement, les résultats ne pourraient être que meilleurs, car la présence d'un observateur peut entrainer des chocs, dus à ses déplacements ou à ses mouvements, ou des variations de température.

L'acquisition par le laboratoire de la Mécanique Appliquée d'un compteur enregistreur nous a permis de concevoir et de réaliser un appareil permettant le relevé des paramètres. Nous en donnons la description dans la seconde partie de cet exposé.

Nous terminons par une brève discussion des possibilités de vérifications expérimentales, concernant les variations de la période en fonction de la tension du fil.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à

Monsieur le Professeur MESNAGE, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure de Chronométrie et de Micromécanique, pour la compétence de ses suggestions et ses encouragements, qui m'ont permis de surmonter les nombreuses difficultés rencontrées au cours de cette étude.

Monsieur le Professeur CHALEAT, Directeur du Laboratoire de Mécanique Appliquée, promoteur de cette étude, pour ses judicieux conseils et sa bienveillance.

J'exprime également mes remerciements à tout le personnel de l'E N S C M, mais plus spécialement à mon collaborateur et ami Gérard LALLEMENT pour l'aide qu'il m'a apportée, à Messieurs OUDET et JACQUET pour les conseils qu'ils m'ont prodigués au cours de la réalisation des circuits électroniques, à Messieurs MAITRE, PETITJEAN, POINTURIER et ROY qui ont contribué aux réalisations pratiques de ce travail.

CHAPITRE I

1-1/ Rappel des travaux les plus marquants effectués sur le Pendule de Torsion au cours de ces dernieres annees.

La publication des premiers travaux de Monsieur JACQUEROD dans le Bulletin de la Société Suisse de Chronométrie date de 1946, et porte pour titre "les écarts à la loi de Hooke et leur importance en chronométrie". Ils remettent en question un principe bien établi chez les théoriciens qui s'étaient occupés jusque là du spiral, et qui considéraient que le couple de rappel était une fonction linéaire de l'angle de torsion (loi de Hooke). La méthode employée est la suivante :

Un fil de torsion fixé verticalement entre deux encastrements supporte en son milieu un équipage de révolution. La fixation supérieure peut tourner et porte une graduation.

Partant d'une torsion nulle on mesure la période T_o pour des oscillations de faibles amplitudes (voisine de 1°). On tord le fil d'un angle θ_1 et on mesure la nouvelle période T_1 autour de la nouvelle position d'équilibre, pour des oscillations de même amplitude que précédemment. Les périodes T_1 et T_o étant très voisines l'influence de l'air ambiant sera le même et n'exigera pas de correction. On repète pour une torsion, donc une contrainte nouvelle θ_2 ce qui donne une nouvelle période T_2 etc... Les déformations géométriques étant très faibles si $T_o = T_1 = T_2 = \ldots T_n$ On peut admettre un module constant, la loi de Hooke est obéie. S'il n'en est pas ainsi le module varie avec la contrainte et on aura :

$$\frac{G_n}{G_o} = \frac{T_o^2}{T_n^2}$$

G_n désignant le module de Coulomb pour un angle de torsion $\theta_n/2$. On obtiendra ainsi la variation du module G avec la contrainte, donc les écarts cherchés à la loi de Hooke, représentée par une courbe, ou une formule du genre :

$$G = G_o \ (1 + \alpha\theta + \beta\theta^2)$$

α, β étant des constantes ayant des valeurs numériques très petites devant l'unité.

Les mesures ont été effectuées avec des fils de nature différente, (acier, élinvar, maillechort) auxquels on faisait subir des traitements thermiques (recuit).

De ces expériences Monsieur Jacquerod tirait les conclusions suivantes :

La loi de Hooke n'est qu'une loi approchée, et on ne peut dire d'une façon générale qu'elle est le domaine de son application.

Le frottement interne ne joue aucun rôle dans les écarts que l'on peut constater à la loi de Hooke. Par contre les propriétés ferro-magnétiques semblent être responsables, en majeure partie du moins, de la non valabilité de cette loi. Le recuit augmente le module et diminue les écarts d'élasticité.

L'année suivante, en 1947, Monsieur Jacquerod présente une nouvelle communication, publiée dans le Bulletin de la Société Suisse de Chronométrie, qui concerne l'étude des variations de la période d'un pendule de torsion en fonction de l'amplitude. cette deuxième série d'expériences avait pour but de vérifier les données fournies par les premières mesures, et en particulier de montrer que la période pour de grandes amplitudes pouvait être déterminée avec suffisamment de précision par le calcul, connaissant la courbe $G = f(\theta)$. La méthode utilisée est la suivante.

L'équipage du pendule de torsion est muni d'un miroir qui réfléchit un faisceau lumineux et donne sur une échelle un spot. Si le pendule oscille le spot se meut sur l'échelle. Mais si l'éclairement n'a lieu que pendant un temps très court (impulsion lumineuse) et qu'il soit de plus synchronisé par une horloge de précision (une impulsion toutes les secondes par ex.) on pourra déterminer la période par la méthode classique des coïncidences. Il suffira d'ajuster la période du pendule au voisinage d'un multiple ou d'un sous multiple entier de 1 seconde, de mesurer le temps séparant par exemple le passage du spot au zéro, et de compter le nombre d'oscillations entre ces deux coïncidences.

Les résultats de cette deuxième série de mesures ont surpris Monsieur Jacquerod. En premier lieu il s'attendait à voir diminuer la période en fonction de l'amplitude, or à une exception près (acier nickel traité à 710°) les fils employés pour ces expériences (acier nickel non traité S.H.D 90, cuproberryllium, bronze phosphoreux) donnent une augmentation de la période en fonction de l'amplitude.

Des courbes tracées on peut déduire que la loi de Hooke est mieux vérifiée pour les grandes amplitudes que pour les petites, ce qui est en opposition totale avec ce qui était admis implicitement avant ces expériences.

Enfin les variations du décrément logarithmique en fonction de l'amplitude montre que le frottement interne ne joue aucun rôle dans les variations de période en fonction de l'amplitude.

Les écarts sont plus importants (selon le cas des petites amplitudes) pour les alliages ayant des propriétés ferro-magnétique.

Ces conclusions incitaient à une étude plus approfondie, d'autant plus que l'utilisation de fils de torsion se généralisait pour les appareils de mesure de précision (galvanomètre par ex) et que le faible amortissement qui caractérise le pendule de torsion peut présenter un intérêt chaque fois que la puissance

de la source d'entretien est limitée (oscillateurs pour fusée, pendulette atmos, pendulette fonctionnant à l'aide de cellule, etc...). En particulier pour limiter les déplacements latéraux de la masse pendulaire, il est souvent nécessaire de prévoir deux encastrements aux deux extrémités du fil et de soumettre ce dernier à une tension suffisante. Expérimentalement la traction axiale modifie la période. Mais la théorie classique de l'élasticité ne la fait pas intervenir. Cette théorie était donc insuffisante et il fallait trouver des relations qui traduiraient mieux les phénomènes observés.

Monsieur CHALEAT entreprit alors des recherches sur ces problèmes et proposa des relations qu'il était nécessaire de confronter avec des résultats expérimentaux. Il demanda à un élève de fin d'année de l'I C M B, Monsieur Altenburger, d'effectuer des mesures à titre de Travail de Diplôme Scientifique. Le sujet proposé était le suivant :

Influence de la traction axiale donnée au fil de suspension sur la Période d'un Pendule de Torsion

"Dans de nombreux cas, on est amené à étudier les oscillations d'un corps suspendu à un fil élastique fortement tendu. Pour préciser il en est ainsi lorsqu'on réalise un pendule de torsion et que l'on cherche à diminuer l'amplitude des déplacements transversaux de l'oscillateur par une tension convenable du fil. Il en est également ainsi pour les oscillateurs de torsion que l'on utilise dans certaines fusées, et dont les masses oscillantes sont soumises à de très fortes accélérations.

Enfin, dans les très belles expériences de Monsieur Jacquerod sur l'isochronisme du pendule de torsion, il n'a pas été tenu compte de la variation systématique de la traction au cours des expériences. Il serait donc intéressant de reprendre, à la lumière des résultats qui pourront être trouvés, des expériences analogues et voir quelle part de la variation de période peut être attribuée à la traction axiale, quelle part revient au défaut d'isochronisme.

Le travail consiste en la réalisation (en mécanique de grande précision) d'un pendule de torsion dont l'un des encastrements sera réglable. Le pendule devra osciller avec une période T bien définie T = 1 ou 2 ou 3 secondes, ou T = 1/2 ou 1/3 ou 1/4 de manière à pouvoir réaliser au chronographe Belin l'enregistrement de petites variations de T. En conséquence il faudra pouvoir ajuster finement le moment d'inertie de la masse oscillante. L'inscripteur du chronographe sera actionné par l'intermédiaire d'un contact photoélectrique.

Il sera utile de prévoir la mesure simultanée de l'amplitude, soit directement, soit par enregistrement photographique. Pour la lame de suspension, on utilisera différents métaux : bronze, cuivre, acier, élinvar, etc...

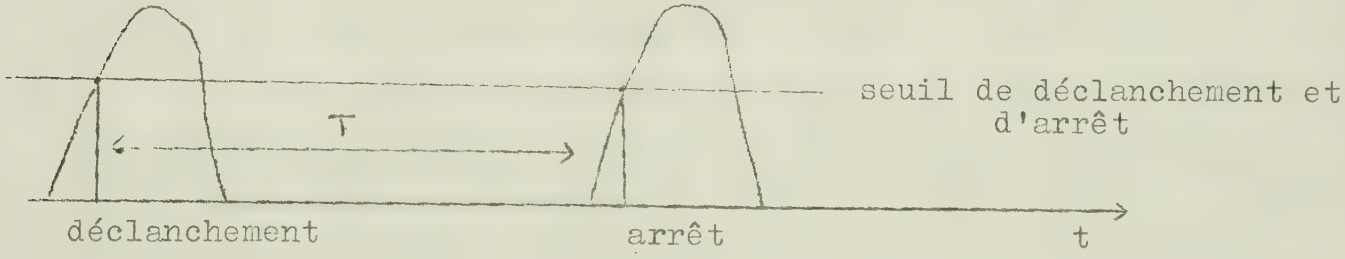
La seconde partie du travail concerne les expériences sur cet oscillateur. Faire croître continuellement la traction axiale depuis zéro et revenir en arrière : comparer les résultats aller et retour.

Examiner ensuite si la vérification avec les formules que j'ai obtenues élémentairement se fait correctement. Enfin reprendre le travail de Monsieur JACQUEROD et examiner numériquement comment intervient la traction axiale".

Raymond CHALEAT

L'enregistrement au chronographe Belin ne permet que de mesurer les variations moyennes de la période. En effet ΔT est déterminé par la pente que fait la droite joignant les sommets des enregistrements avec une droite repère (une génératrice quelconque du cylindre d'enregistrement). La précision est d'autant meilleure que la variation est linéaire sur le plus grand nombre possible de périodes. Or l'amplitude varie à chaque période. Comme il s'agit de mesurer la valeur de la période pour une amplitude et une traction axiale données, l'enregistrement du chronographe Belin ne sera pas particulièrement indiqué. On peut d'ailleurs faire les mêmes reproches à la méthode des coincidences utilisée par Monsieur JACQUEROD. Cette méthode ne permet que de donner la période moyenne pour une amplitude variant de A_o à $A_o + \Delta A_o$, A_o mesurant la variation d'amplitude entre deux coïncidences.

Sur proposition de mon collègue OUDET (qui était à l'époque élève à l'I.C.M.B), une autre méthode a été adoptée. Elle est basée sur l'emploi d'un"compteur électronique" utilisé en chronomètre . Le déclanchement et l'arrêt du compteur étant réalisés à partir de signaux provenant d'une cellule photo-électrique. La forme de deux signaux consécutifs étant très peu différente, et le déclanchement et l'arrêt étant définis par un seuil précis, les mesures doivent, théoriquement, pouvoir être réalisées avec une bonne précision.



Les signaux issus de la cellule commandent une bascule de schmitt, après dérivation des signaux provenant de cette dernière, on élimine l'impulsion négative puis on amplifie l'impulsion positive (qui devient négative après amplification) de telle façon à pouvoir commander une bascule bistable. A chacune des plaques de cette dernière on obtient respectivement des

impulsions de signe contraire, changeant de signe à chaque impulsion lumineuse. Le compteur utilisé à l'époque était un compteur S.E.A à 5 colonnes. Le déclenchement et l'arrêt étaient obtenus en envoyant respectivement sur la borne "déclenchement" ou "arrêt" une impulsion négative d'amplitude $\geqslant$ 30 volts et de temps de montée $< 1\ \mu$ s.

La conception du circuit de déclenchement du compteur à partir des impulsions délivrées par la cellule n'offre pas de difficultés particulières. La réalisation pratique est plus délicate. Le seuil de déclenchement de la bascule doit être peu élevé ($<$ 10 volts) pour éviter l'amplification des impulsions photo-électriques (amplification qu'il est souvent difficile de bien réaliser). D'autre part ce seuil doit être très stable. La bascule quelles que soient les impulsions reçues ne doit pas présenter de tendance à l'"accrochage" (fonctionnement en multivibrateur). Les signaux délivrés au compteur doivent respecter les normes du constructeur, et en particulier pour le compteur S.E.A il n'était guère souhaitable d'appliquer une impulsion négative à l'une des bornes et une impulsion positive à l'autre.

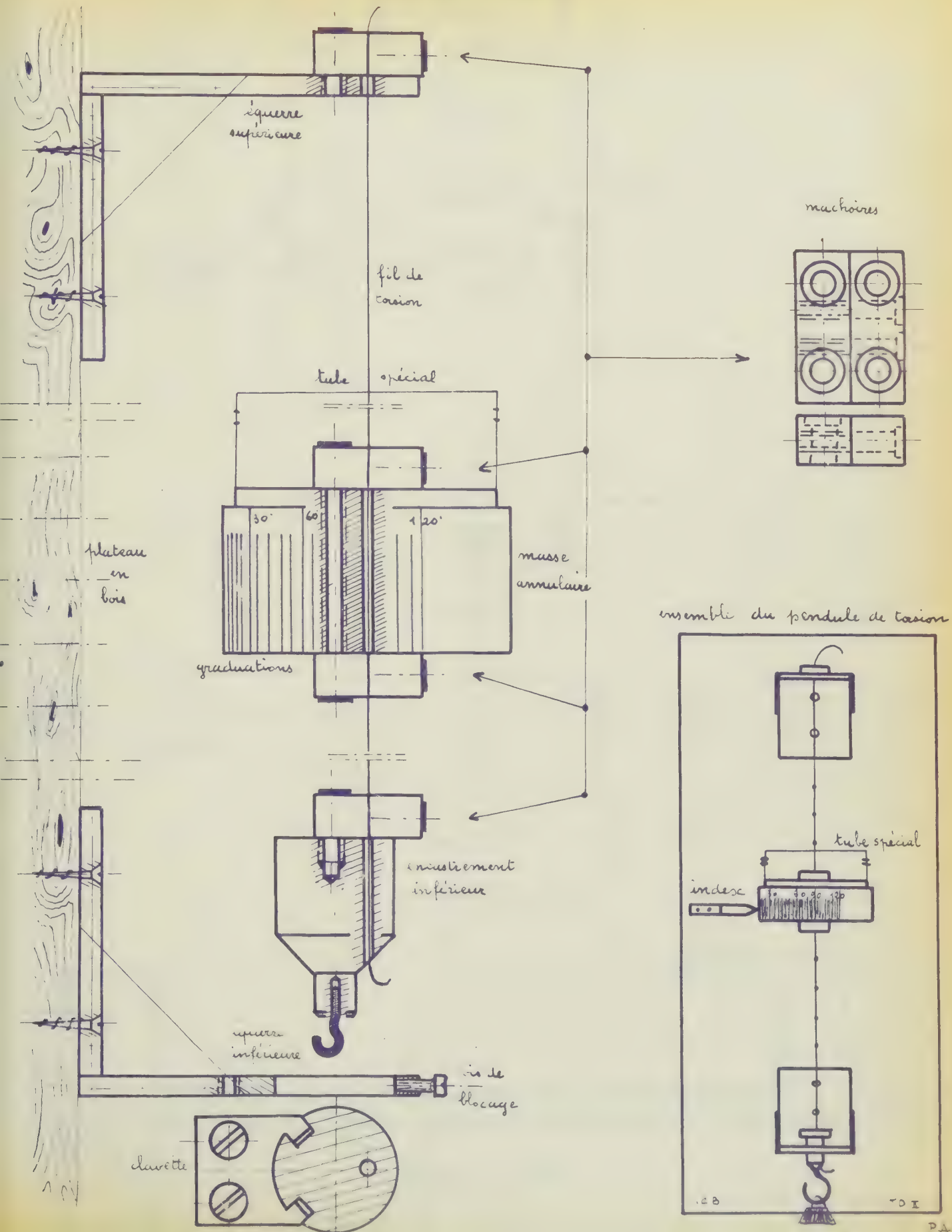
Les mesures faites par Monsieur ALTENBURGER ont été effectuées à l'aide d'un circuit conçu et réalisé par Monsieur OUDET. Les caractéristiques de ce circuit, données par Monsieur ALTENBURGER dans son compte rendu, ont été déterminées à l'aide d'un oscilloscope dont la bande passante est plus petite que 300 Kc, et par suite ne sauraient être tenues pour valable.

La valeur métrologique des expériences de Monsieur ALTENBURGER ne sauraient faire illusion, et il faut le remercier hautement d'avoir eu l'honneteté de le dire. Je le cite : "Pour une amplitude et une traction axiale constante nous devons en réiterant plusieurs fois la mesure de période, retrouver la même lecture du compteur. Toute différence constatée, est par définition une erreur. Nous comptions avec ce montage atteindre facilement une précision correspondant à des erreurs absolues de l'ordre de 10^{-4} sec, et peut être de l'ordre de 10^{-5} sec. Or la suite du travail montre que la même mesure réitérée 3 fois par exemple donnait des différences atteignant 10^{-2} sec.

Or, si on se reporte aux travaux de Monsieur JACQUEROD on constate que pour des périodes de même ordre de grandeur la variation de période en fonction de l'amplitude (pour des variations importantes d'amplitude de l'ordre de 100 θ) est de l'ordre de 10^{-3} sec. Pour les variations dues à la traction axiale, les mesures effectuées par Monsieur ALTENBURGER font apparaitre pour une tension variant entre 3 et 14,5 kg (masse) une variation des valeurs moyennes de la période de l'ordre de 10^{-1}. La précision de l'appareillage utilisé était donc nettement insuffisante pour tirer une conclusion valable des mesures.

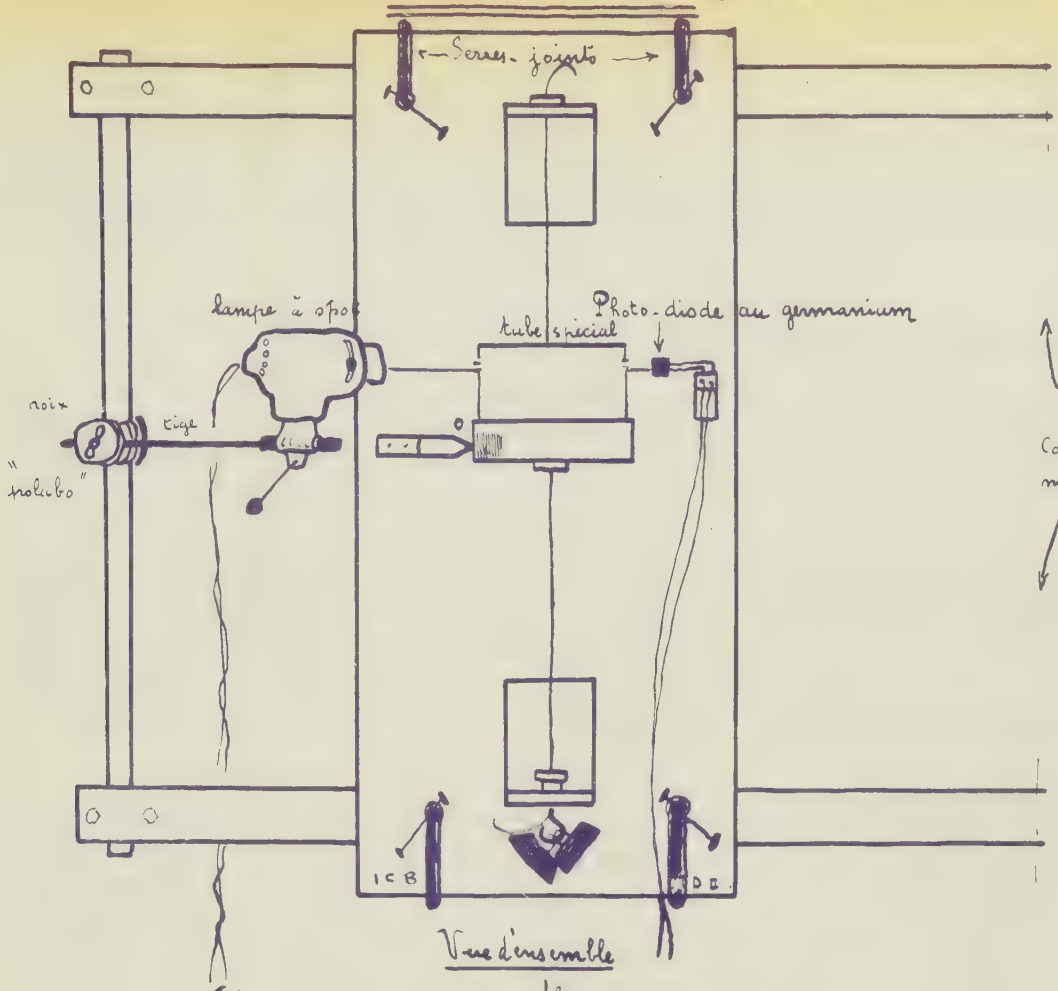
Une question se pose naturellement : Quelles sont les causes de cette imprécision ? Monsieur ALTENBURGER dans son

~ Planche 1 ~

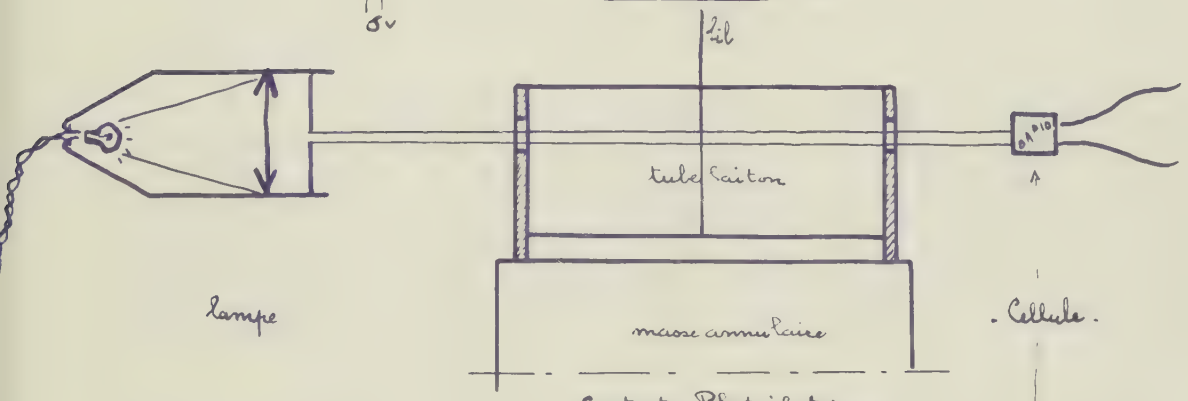


PA 56

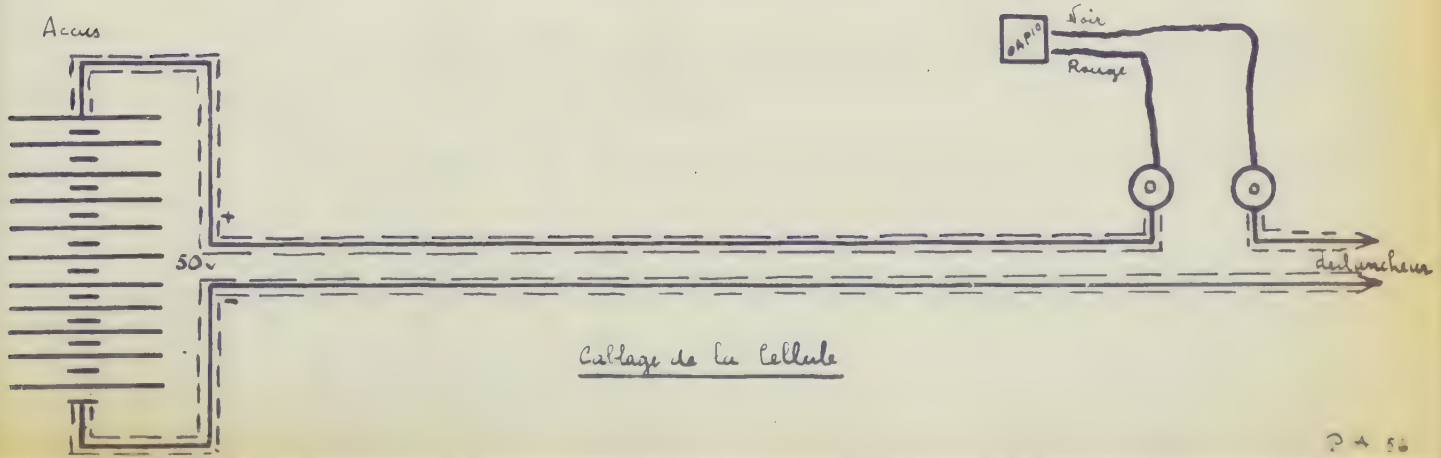
Planche 2



Vue d'ensemble



Contact - Photoélectrique



Câblage de la Cellule

P. 58

rapport indique, qu'à son avis, seul les déplacements latéraux (parasites) de la masse amulaire, sont cause des variations constatées pour des mesures effectuées dans des mêmes conditions. (Amplitude et traction axiale identique).

1-2/ Projets concernant la construction du pendule

Le rappel précédent, fait suivant un ordre chronologique, avait pour but de préciser d'une part le sens des recherches entreprises à l'I.C.M.B, et d'autre part la nature de "l'héritage" qui m'était imparti.

En me confiant le soin de reprendre ces expériences, Monsieur MESNAGE, se basant sur les conclusions du rapport, m'avait invité à diriger mes premières recherches, dans l'étude d'un système mécanique de "lancement", qui permettrait à l'équipage mobile, à partir d'une amplitude donnée, d'osciller autour de son axe de rotation avec un minimum d'autres mouvements parasites.

Le pendule construit par Monsieur ALTENBURGER n'avait qu'un rapport assez lointain, avec la réalisation en mécanique de grande précision préconisée par Monsieur CHALEAT dans ses propositions et la fixation de l'appareil ne respectait guère les règles élémentaires de métrologie, qui dans le but d'éviter des oscillations parasites, cherchent en premier lieu à réduire au maximum le couplage avec toute source pouvant émettre des ébranlements.

Si ce matériel était inutilisable pour faire des mesures précises, il pouvait néanmoins servir pour effectuer des comparaisons, mais de toute façon il fallait prévoir la réalisation d'un nouveau pendule. Pour la construction de ce nouveau matériel, en admettant (à priori il est vrai et j'indiquerai plus loin pourquoi) que les mouvements latéraux étaient la principale cause de l'imprécision des mesures, cela imposait de respecter au mieux les conditions suivantes :

1°) Alignement rigoureux des 4 encastrements (aux deux extrémités du fil et de part et d'autre de la masse pendulaire).

2°) Masse pendulaire équilibrée statiquement et dynamiquement pour éviter la possibilité d'entretien d'oscillations transversales dues au "balourd".

3°) Système de lancement évitant au maximum les déplacements latéraux.

4°) Fixation rigide de l'appareillage. L'utilisation comme support d'un pilier en ciment armé était toute indiquée.

Si les conditions 1, 2 et 4 étaient susceptibles d'admettre des solutions satisfaisantes avec les moyens classiques de la mécanique de précision, la condition 3 était beaucoup plus

difficile à obtenir. Le problème est le suivant : il faut donner une certaine élongation au pendule de torsion, le bloquer dans cette position en veillant à ce qu'il n'y ait aucune translation par rapport à l'axe de rotation, et ensuite le libérer en évitant que le système permettant le lancement ne produise des chocs.

Mes premières recherches ont donc porté sur l'étude de "systèmes" qui auraient permis le lancement idéal de l'oscillateur. Deux voies sont possibles : 1°/ On bloque la masse pendulaire par un système centré autour de celle-ci (le problème du centrage n'est pas aisé à réaliser). 2°/ Un des encastrements est mobile autour de l'axe, on donne donc par ce moyen une certaine torsion. On attend que l'oscillateur s'arrête, puis on ramène l'encastrement à sa position première (au cours de cette dernière opération on introduit des chocs qu'il est impossible d'éviter). J'ai utilisé des systèmes basés sur les deux catégories énoncées ci-dessus, les réalisations n'ont jamais donné bien satisfaction.

Pour la construction d'un nouveau pendule Monsieur MESNAGE m'avait conseillé d'utiliser un banc de tour, ce qui présentait les avantages suivants : bonne rigidité et bon alignement des deux encastrements. Possibilité de régler facilement la longueur du fil de torsion par simple déplacement de la poupée fixe. Possibilité de lancer le pendule par rotation de l'encastrement supérieur.

Il n'était pas question d'envisager l'achat d'un tour neuf, mais les réserves de l'E N H en matériel desuet nous permirent de récupérer un petit tour qui pouvait parfaitement faire l'affaire. Tout semblait se présenter sous les meilleures augures, pour entreprendre rapidement des mesures, mais un petit détail devait faire ajourner ce projet. Les pinces qui équipaient ce tour étaient d'un modèle épuisé commercialement, et le plus petit diamètre de celles que l'on avait pu récupérer était 1 mm. Les fils les plus gros étirés par les Spiraux Français mesuraient 0,8 mm de diamètre.

1-3/ Construction d'un nouveau circuit de mise en forme

Monsieur CHALEAT m'ayant demandé d'effectuer des mesures sur un bifilaire (étude de la variation de période en fonction de l'amplitude, pour différentes longueurs des fils de suspension), j'utilisai la technique décrite précédemment de déclanchement d'un compteur. Je m'aperçus alors que le système de déclanchement utilisé par Monsieur ALTENBURGER pour ses mesures était capricieux et que par suite on ne pouvait lui attribuer qu'une confiance limitée. Si on voulait réaliser des mesures précises il fallait donc en premier lieu construire un ensemble électronique stable capable d'atteindre la précision que l'on s'était fixée.

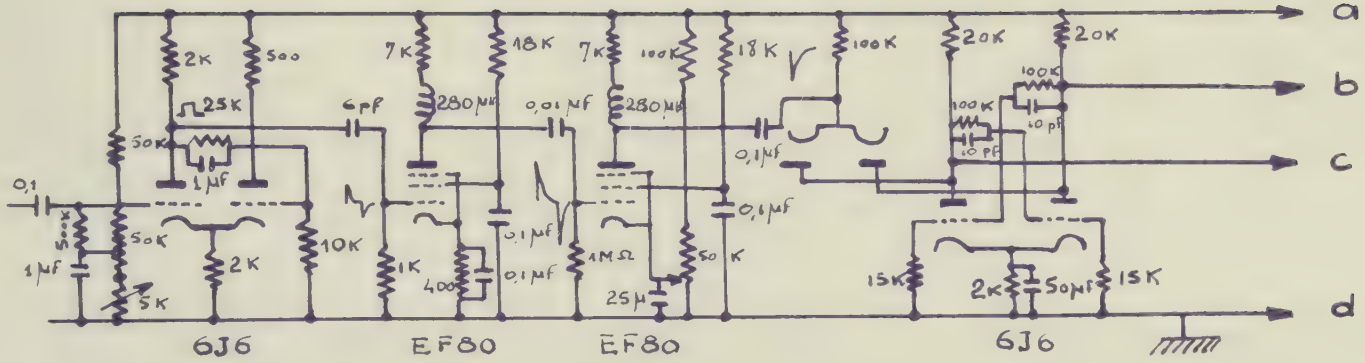
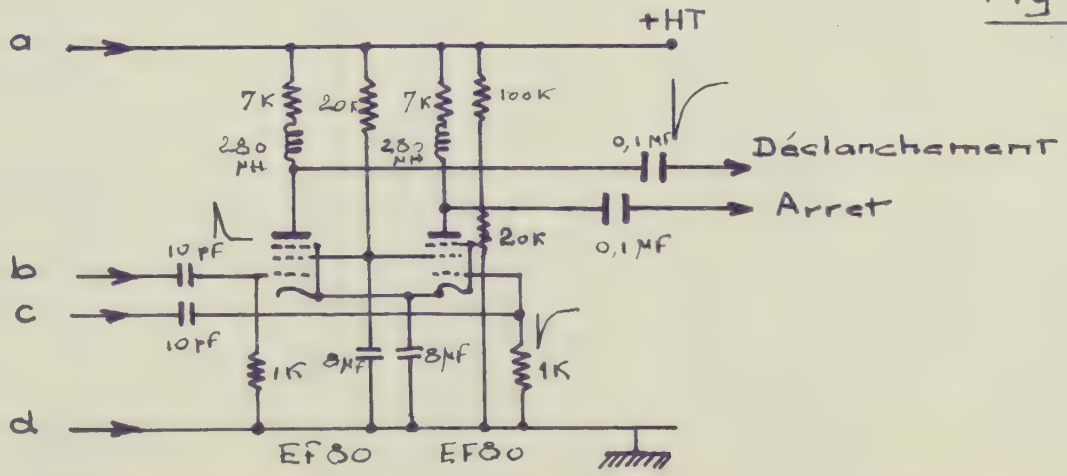

a
b
c
d
2K
500
25K
50K
1 µF
0,1
1 µF
50K
2K
10K
5K
7K
18K
280 µH
6 pF
0,01 µF
1K
400
0,1 µF
0,1 µF
7K
100K
280 µH
1MΩ
25µ
50K
18K
100K
0,1µF
0,1µF
20K
20K
100K
100K
10 pF
10 pF
15K
2K
50µF
15K
6J6
EF80
EF80
6J6

Fig 1

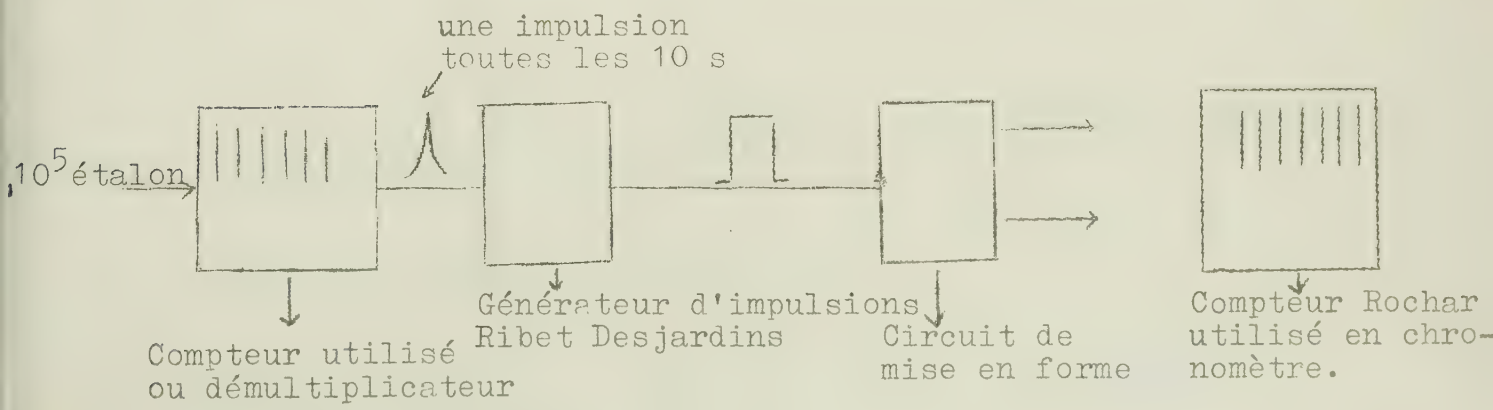

a
+HT
7K
20K
7K
100K
280 µH
280 µH
0,1 µF
Déclanchement
Arret
0,1 µF
20K
10 pF
b
c
10 pF
1K
8µF
8µF
1K
d
EF80
EF80

Je donne ci-contre le schéma de la réalisation à laquelle je fus conduit. La double triode 6J6 est montée en bascule de Schmitt. Le signal rectangulaire issu de l'une de ces plaques est dérivé puis amplifié par une EF 80 avec correction H.F. La deuxième EF 80 étant au cut off élimine l'une des deux impulsions, pour ne donner à sa sortie qu'une impulsion négative réglable en hauteur (max. 30 v environ), cette dernière commande une bascule bistable. Les signaux provenant des deux plaques sont dérivés puis amplifiés chacun par une EF 80 travaillant au cut-off. L'impulsion délivrée pour la commande du compteur est réglable en hauteur de 0 à 60 volts, son temps de montée est $\leq 1\,\mu s$, sa durée totale voisine de $4\,\mu s$. (les mesures du temps de montée ont été faites avec un oscilloscope C R C OC 410 dont la bande passante est voisine du Mcs).

1-4/ Contrôle du système de déclenchement

Une première impulsion positive à l'entrée du système électronique provoque le déclenchement du compteur fonctionnant en chronomètre. Une deuxième impulsion positive provoque l'arrêt du compteur. Si l'on connait avec une précision suffisante l'intervalle de temps séparant les deux impulsions, cet intervalle doit coïncider exactement avec l'indication du compteur. Toute différence permettant de déduire la précision du système.

Voici succintement exposé la méthode que nous avons utilisée. Un compteur électronique auxiliaire sert de démultiplicateur et donne à partir du 100 000 étalon une impulsion toutes les 10 secondes. L'intervalle de temps entre deux impulsions est donc défini avec la précision de la fréquence étalon, c'est-à-dire à 10-7 près. Nous attaquons ensuite le générateur d'impulsion "Ribet-Desjardins" qui nous permet d'obtenir sous une impédance relativement basse des impulsions réglables en largeur et en hauteur. L'impulsion issue du générateur Ribet attaque directement le circuit de mise en forme (sous test) qui commande un compteur Rochar à 7 colonnes.



1-5/ Résultats

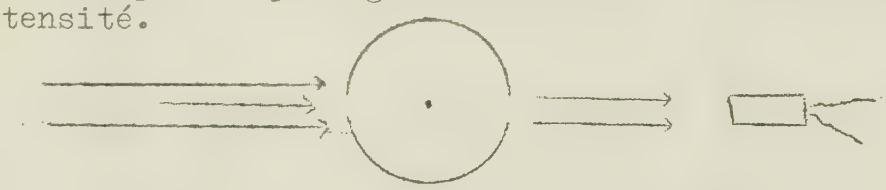
L'indication du compteur Rochar entre deux impulsions est 0 000 000 (portant sur 500 essais consécutifs). Ce qui indique que le système de déclenchement est capable de donner une précision au moins égale à 10^{-6} s'il est correctement attaqué.

1-6/ Mesures réalisées sur un pendule de torsion

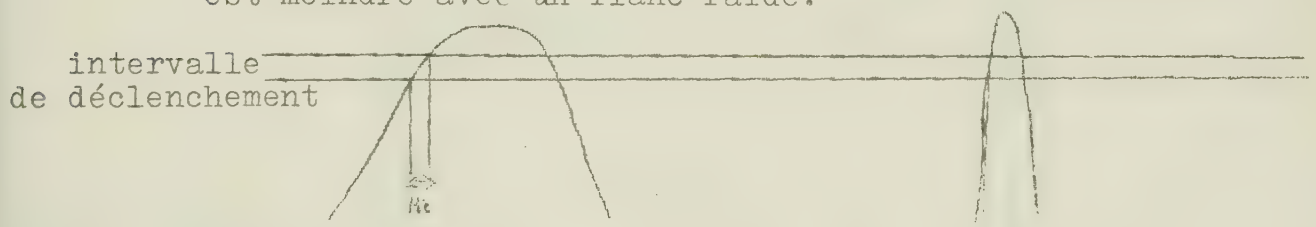
Le pendule de torsion réalisé par Monsieur ALTENBURGER (voir figure ci-jointe) ne pouvait conduire à des résultats métrologiques valables pour l'étude envisagée. Les améliorations suivantes devaient être apportées en plus des conditions mentionnées précédemment.

a) Obtenir une impulsion lumineuse à flancs raides

Permettant une définition plus précise du seuil de déclenchement. Le système utilisé par Monsieur ALTENBURGER (alignement d'une source lumineuse et de deux trous circulaires) se traduisait par un passage non discontinu entre le 0 et le maximum d'intensité.

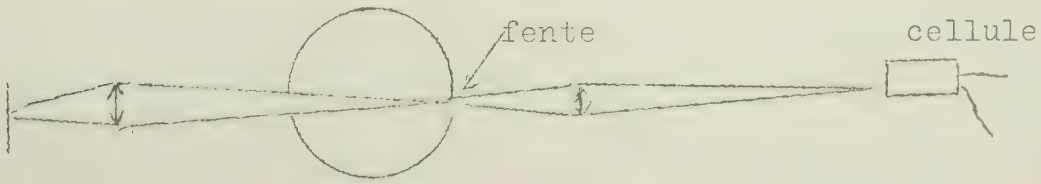


A première vue cela semblerait sans importance. Mais il ne faut pas oublier que le seuil de basculement d'un Trigger de Schmitt n'est pas une constante mais un petit intervalle. Une représentation considérablement grossie montrera que l'erreur est moindre avec un flanc raide.

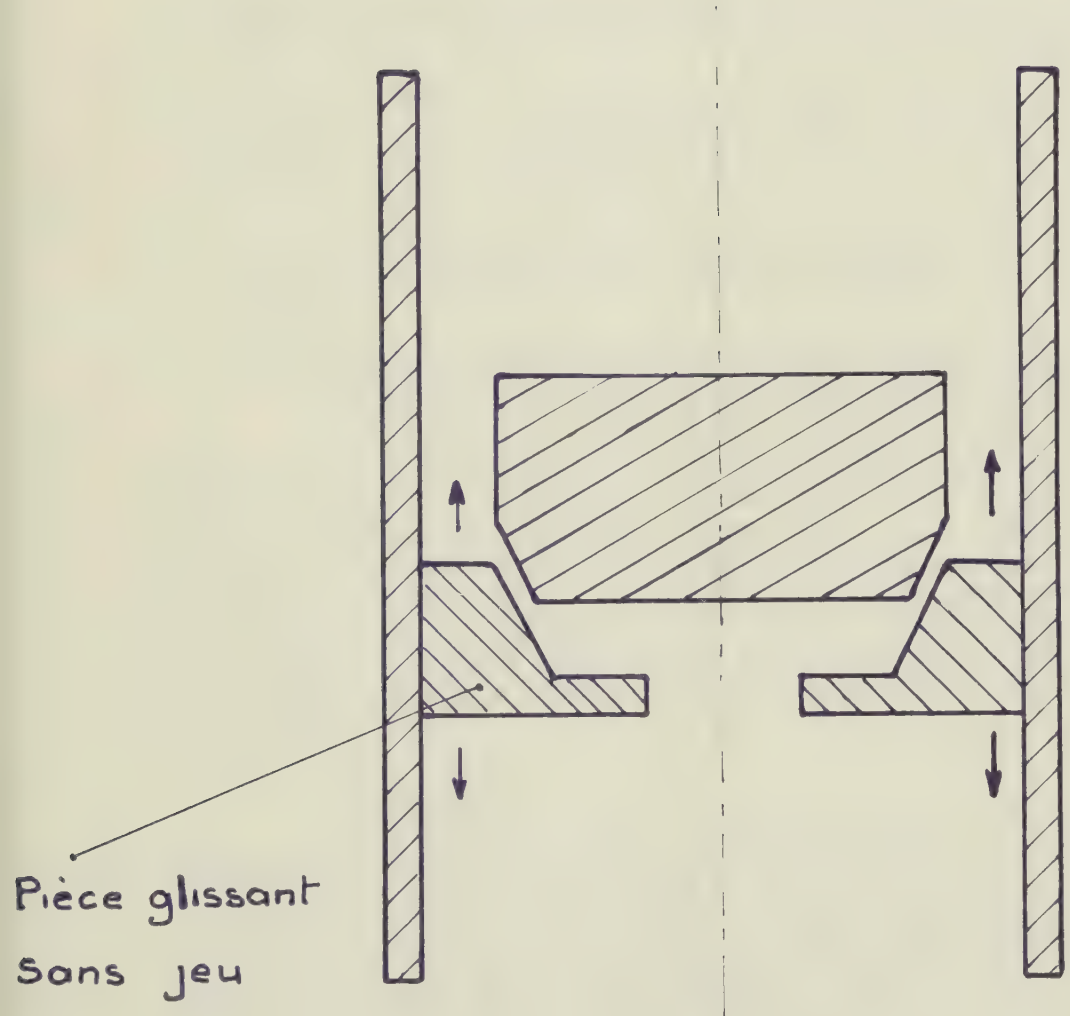


La durée du signal peut aussi intervenir. Dans le cas des signaux de durée importante, la présence "d'overshoot" peut compromettre la stabilité.

Un système de fentes, bien qu'il réduise l'énergie de commande serait donc préférable.



SCHEMA DONNANT LE PRINCIPE
DE LANCEMENT DU PENDULE



Pourquoi ne pas avoir utilisé un miroir de Poggendorf ? Il présente cependant l'avantage principal de réduire la durée du signal lumineux et par suite de présenter des flancs plus raides que pour des autres systèmes. Mais malheureusement son rendement énergétique est très faible, ce qui conduit obligatoirement à une amplification du signal délivré par la cellule , amplification qu'il est difficile à bien réaliser du fait que la durée et par suite la forme du signal varie avec l'amplitude. Il faut donc réaliser une amplification "linéaire" pour des durées d'impulsions comprises dans un certain domaine. L'idéal serait l'emploi d'un photo multiplicateur, c'est la solution que nous avons finalement adoptée, nous y reviendrons avec plus de détails lors de la présentation de l'appareillage définitif.

b) Mesurer les amplitudes avec une précision de l'ordre au moins du degré

La méthode utilisée par Monsieur ALTENBURGER : traits tracés tous les 6° et défilant devant un repère de 1 mm d'épaisseur (cela pour une période voisine de 5 s) ne saurait conduire qu'à une grossière interprétation.

Des traits tracés tous les degrés et un microscope a réticule, donne une solution valable au problème.

c) Lancer le pendule avec le minimum de mouvements parasites

Nous en avons parlé précédemment.

Tout cela a conduit à la réalisation reproduite par le schéma ci-contre. Pour le lancement une pièce glissant sans jeu, dans un cylindre admettant pour axe l'axe de rotation du pendule, vient s'appliquer par emboitement conique contre la masse pendulaire, l'immobilisant pour une torsion repérée du fil. Un rappel rapide de cette pièce libère le pendule. Une mauvaise réalisation mécanique n'a pas permis de se rendre compte de l'efficacité de ce système. Comme nous avions hâte de faire des mesures, nous avons utilisé la "technique" de la rotation de l'encastrement supérieur.

Résultats :

Si la mesure de 2 périodes consécutives, pour de faible amplitude, donnait des résultats meilleurs que ceux de Monsieur ALTENBURGER, erreur de l'ordre de 10^{-3} , les variations n'étaient cependant pas régulières, et on observait des augmentations ou des diminutions brusques de période aléatoires à première vue. On observait aussi des augmentations d'amplitude. D'où pouvait provenir celà ? Des mouvements parasites de la masse pendulaire ? ou plus simplement était-ce un phénomène lié à l'oscillateur ou au système de mesure ?

Dans un premier temps nous avons songé à comparer les résultats précédents à ceux que pourrait donner l'organe oscillateur d'une horloge Leroy. Les degrés de liberté d'un pendule suspendu à une lame élastique étant moindre que ceux d'un pendule de torsion, nous pensions mettre en relief de cette façon, que

l'imprécision était due pour une bonne part aux oscillations parasites. Nous obtenons des résultats à peu près identiques, sauf qu'il y a une certaine périodicité due à l'influence de l'entretien. De toute façon nous ne pouvions donner une conclusion franche.

Puisqu'il était impossible en changeant d'oscillateur de mettre en relief les causes possibles d'erreur, il restait donc à contrôler le système de mesure.

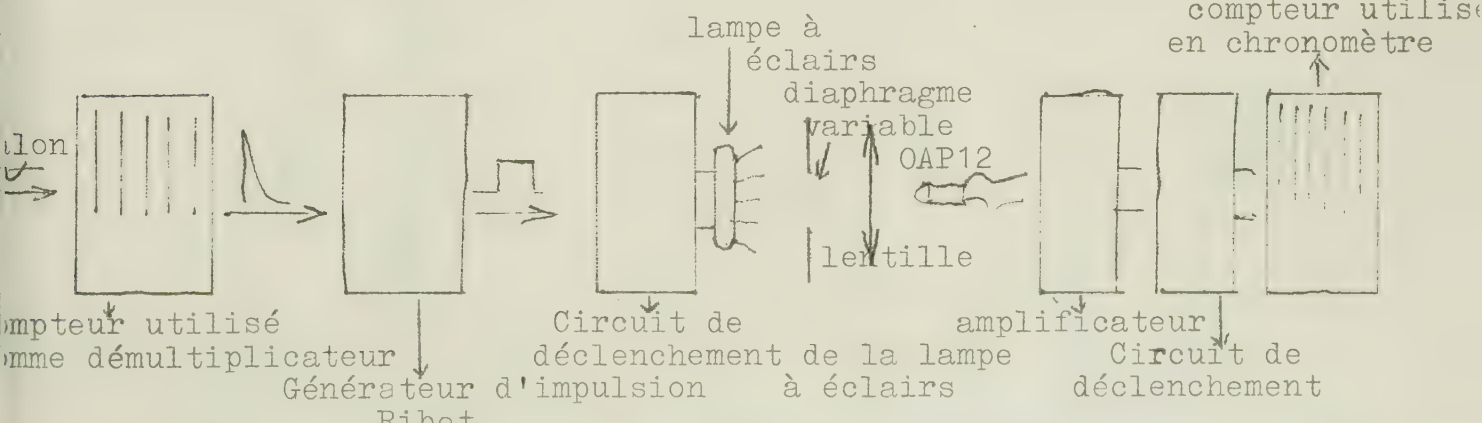
1-8/ Principe du contrôle concernant le système de mesure

Le contrôle du circuit de mise en forme avait déjà été effectué. Il restait donc à vérifier que l'ensemble, cellule photoélectrique amplification (qui pouvait se réveler nécessaire lors de l'emploi de fentes fines) et circuit de mise en forme, était susceptible d'atteindre la précision qué l'on s'était fixée.

Pour cela il fallait provoquer le déclenchement et l'arrêt du compteur par deux impulsions lumineuses séparées par un intervalle de temps connu avec suffisamment de précision, et vérifier que ce temps coincidait, ou non, avec l'indication du compteur.

1-9/ Réalisation

Un compteur électronique, utilisé en démultiplicateur donne à partir du 100 000 étalon une impulsion toutes les 10 s. Le générateur d'impulsion Ribet, permet une mise en forme de cette impulsion et en particulier un réglage de la hauteur et de la largeur de l'impulsion. Les impulsions servent à commander l'ionisation d'une lampe à éclair. L'énergie lumineuse issue de cette dernière est reçue en partie (à l'aide d'un montage optique) par la photo diode O AP 12. Après amplification (pour juger de l'influence de cette dernière) et mise en forme on attaque un compteur monté en chronomètre et alimenté par le 100 000 étalon. Le schéma global de l'ensemble est alors le suivant :

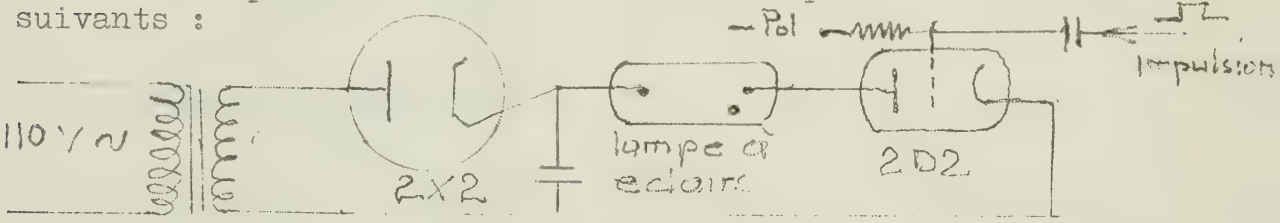


Avant d'étudier et d'interpréter les résultats nous donnerons la description du circuit de déclenchement de la lampe à éclairs.

Circuit permettant d'assurer l'allumage de la lampe à éclairs

La lampe provenait d'un vieux stroboscope, elle était usagée mais pouvait convenir pour une première étude. C'était une lampe basse pression dont la tension d'allumage était voisine de 1200 volts.

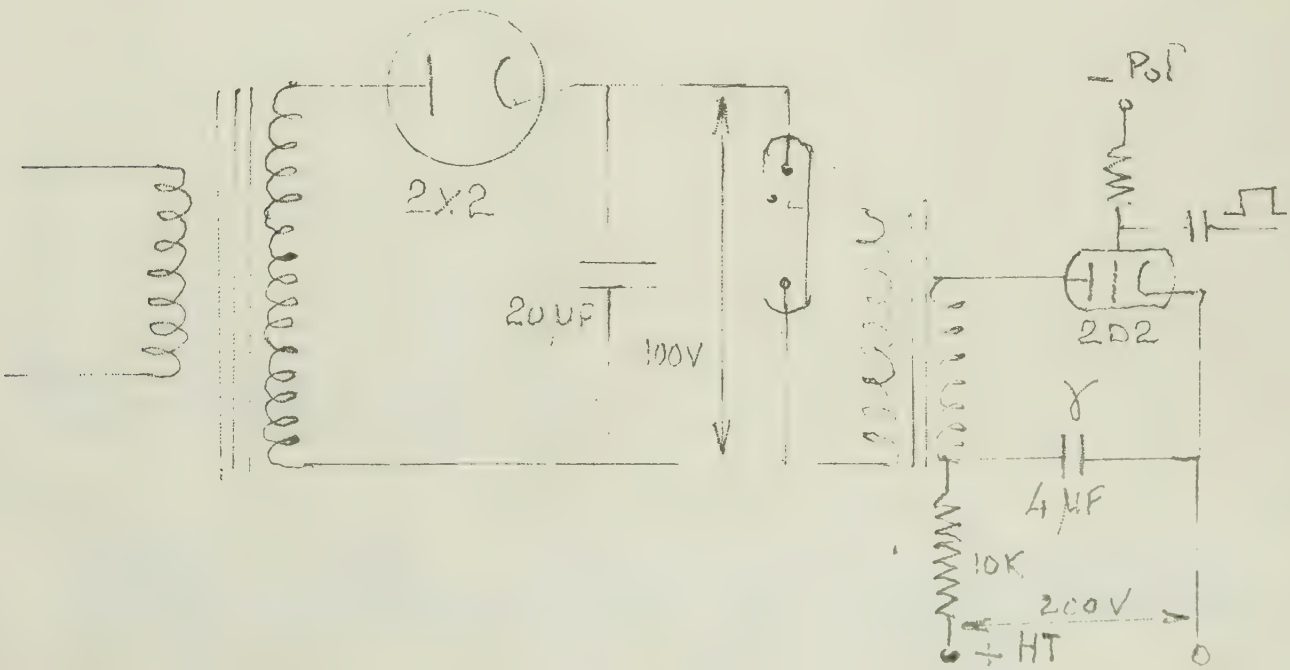
Le premier circuit étudié se composait des éléments suivants :



Nous n'avons pas réussi à mettre au point ce circuit. La première impulsion déclenchait bien l'éclair, mais ensuite il se produisait des oscillations de relaxation (dues probablement à des états métastables de la lampe à éclairs et du Thyratron.

Nous avons donc étudié un système de commande plus classique. En effet la décharge dans la lampe peut être obtenue en utilisant une troisième électrode (fil de laiton entourant le tube) qui portée à un potentiel suffisant provoque l'ionisation de quelques molécules qui assurent alors le déclenchement de la conduction.

En utilisant un deuxième transformateur (analogue à celui qui alimente la 2x2) nous avons réalisé le montage suivant :



Le réglage pour un fonctionnement correct a été délicat il portait sur l'étude de l'influence de 5 paramètres. (H.T de la lampe à éclairs, H.T de l'alimentation plaque du thyratron, valeur de la capacité , hauteur et largeur de l'impulsion de commande. Les valeurs indiquées ici permettaient de donner une conclusion à l'étude que nous nous étions proposés. Nous n'avons donc pas cherché à réaliser les conditions optimums. En utilisant un matériel adapté pour ces fonctions (et non du matériel de récupération) il serait certainement possible d'obtenir de meilleurs résultats.

1-10/ Résultats

Nous les illustrons par deux graphiques. Ils portent sur 101 essais réalisés dans des conditions non particulièrement favorables. (impulsions brusques véhiculées par le secteur lors des commutations des machines à l'atelier), ce qui peut expliquer les écarts importants).

Sur le graphique n° 1 nous avons porté en ordonnées les indications lues sur le compteur et en abscisses le rang des essais successifs. Nous voyons directement que la stabilité est meilleure après un certain temps de service. Nous remarquons d'autre part que les écarts sont soit faibles, soit importants.

Le graphique n° 2 nous permet de déterminer la précision que nous pouvons attendre des circuits sous contrôle. Nous pouvons conclure qu'elle est meilleure que $5\ 10^{-6}$ ce qui est suffisant pour analyser les phénomènes que nous voulons étudier.

Le nombre de 100 essais pourrait paraitre limité ; nous en avons effectué un nombre très important pour mettre au point le circuit d'allumage de la lampe à éclairs. Avec des écarts moyens un peu plus grands, ils confirment la conclusion précédente. D'autre part pourvu que la hauteur de l'impulsion qui commande le trigger de Schmitt, soit nettement plus grande, que le seuil de basculement, l'amplification (du signal provenant de la cellule) n'a aucune influence décelable.

Ainsi nous arrivons à un résultat important : l'imprécision constatée dans les mesures précédentes était liée à l'oscillateur.

1-11/ Etudes portant sur l'oscillateur

Ces études devaient porter sur plusieurs domaines. En premier lieu il fallait déterminer l'influence des oscillations parasites (que l'on produirait par choc) sur la période. Il fallait aussi étudier l'influence de la température et de l'amortissement visqueux produit par le milieu ambiant. Mon collègue Gérard LALLEMENT se chargea de toutes ces études, on se reportera donc utilement à sa thèse de troisième cycle (présentée en mai 1962. Je ne citerai que ses conclusions les plus importantes.

Les chocs de faibles amplitudes modifient pas ou peu la période d'oscillation, les écarts les plus importants sont relevés après le choc, ils s'atténuent assez rapidement.

Les variations de température ont une influence importante sur la période. Il sera donc souhaitable d'opérer les mesures dans un lieu présentant de faibles écarts de température.

En dessous d'une pression de 10^{-4} mm de Hg on peut considérer que les frottements n'ont pour seule origine que la nature du fil de torsion (frottement interne).

Gérard LALLEMENT a constaté, comme moi, au cours de ses mesures des variations aléatoires de la période. Il a constaté aussi, comme je l'avais fait dans des mesures précédentes, qu'il est impossible d'obtenir deux courbes d'amortissement semblables, même avec des conditions initiales (amplitude, température) identiques. Les différences constatées atteignent 10^{-4} s. Il semble que la limite de définition de la période soit 10^{-4}. Toute étude portant sur des variations de cet ordre de grandeur ou d'un ordre plus petit serait une utopie.

Projet d'étude concernant le pendule de torsion

Les études précédentes permettent de limiter le domaine où doivent se poursuivre les recherches. Contrairement à ce qu'on pouvait penser, les variations de période ne sont pas uniformes. Nous pouvons étudier les variations moyennes ce qui présente un grand intérêt en chronométrie, mais si nous fondions quelques espoirs, d'accroitre nos connaissances sur l'élasticité par cette méthode, nous devons les abandonner. Les méthodes chronométriques qui ont rendu et rendront encore de grands services ont leur limite, à partir d'un certain stade elles doivent laisser place à d'autres techniques. Pour les problèmes qui nous intéressent la réponse viendra certainement de l'accroissement de nos connaissances sur le solide, c'est le microscope électronique, les appareils à rayon X etc, qui devront se substituer au chronomètre.

Néanmoins l'utilisation de plus en plus importante du pendule de torsion, et les renseignements, d'ordre chronométrique, que peut apporter l'étude des oscillations, conservent une grande actualité à ces recherches.

CHAPITRE II

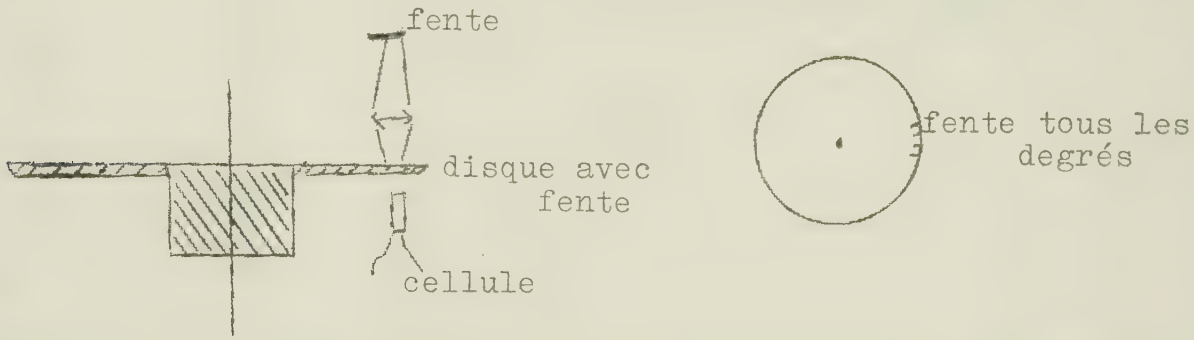
2-1/ Nous avons vu précédemment que les conditions fixées pour l'expérimentation sont sévères. Il faut travailler à température constante (ou au moins peu variable). Il serait souhaitable de faire osciller le pendule dans le vide, ce qui éliminera l'influence des frottements visqueux sur la période, mais fixera les dimensions du pendule de telle façon qu'il puisse entrer dans "la cloche". Il faudra éviter le couplage avec toutes les sources possibles d'ébranlement. Nous serons donc conduits à l'utilisation d'un matériel beaucoup plus complexe que celui utilisé pour les premières expériences.

L'étude proprement dite se résumera au tracé des courbes amplitude-période et à leur interprétation. L'amortissement du pendule étant faible, le relevé de ces paramètres est long et fastidieux. La présence de l'opérateur, dont l'immobilité ne peut être parfaite peut introduire des ébranlements. Il est d'autre part souhaitable d'opérer de nuit ; meilleure stabilité de la tension du secteur, température plus stable. Tout cela milite en faveur d'un enregistrement automatique. L'acquisition par le Laboratoire de Mécanique Appliquée d'un compteur enregistreur rendait possible ce projet. En accord avec Monsieur MESNAGE nous avons décidé de limiter notre travail de thèse à la réalisation d'un appareil permettant l'enregistrement automatique de la période et de l'amplitude d'un pendule de torsion.

2-2/ Conception de l'appareil

Pour l'enregistrement de la période, il suffit de réaliser un circuit de mise en forme, des signaux provenant de la cellule, et fournissant des signaux de commande correcte. Nous en avons décrit le principe dans les pages précédentes, et nous avons parlé de la précision de tels circuits.

Pour l'enregistrement de l'amplitude nous utilisons la méthode suivante :

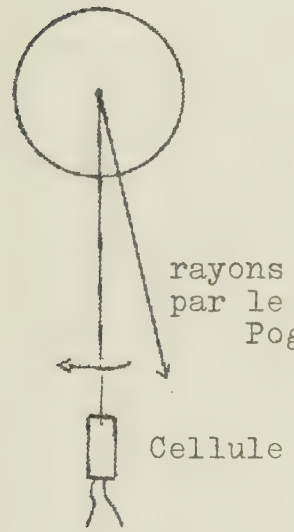


Un disque solidaire de la masse pendulaire comporte sur sa périphérie une fente tous les degrés (360 fentes en tout). Cette fente de 0,3 mm de largeur est éclairée ou non (suivant la position du disque) par l'image d'une fente lumineuse, la largeur de cette image étant la même ou plus petite que celle de la fente.

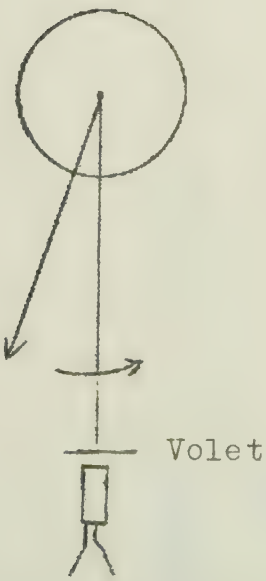
Lorsque le disque est en rotation autour de son axe, chaque passage d'une fente devant la cellule donnera une impulsion. Ces impulsions seront comptées par un compteur monté en chronomètre. Si au passage à l'équilibre on déclanche le compteur, et que l'arrêt soit effectué au second passage à l'équilibre (demi période) le nombre d'impulsions mesurera le double de l'amplitude. Pour une période il mesurerait quatre fois l'amplitude.

Le même compteur permet donc l'enregistrement de la période et de l'amplitude. Au cours d'une première période, alimenté par du 100 000 étaion il mesure la période, au cours de la seconde, alimenté par les impulsions provenant du défilement des fentes il mesure l'amplitude, et ainsi de suite.

Détaillons les diverses opérations :



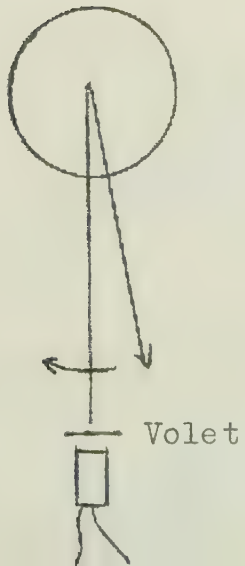
Le premier passage à la position d'équilibre entraine le déclenchement du compteur alimenté par du 100 000 étalon et provoque (avec retard) la fermeture d'un volet devant la cellule



Le deuxième passage à l'équilibre ne produit rien, la cellule étant soustraite à l'influence des rayons lumineux.

Le troisième passage à l'équilibre arrête le compteur et provoque avec un retard un changement de commutation dans l'alimentation du compteur. Ce dernier reçoit alors les impulsions provenant du défilement des fentes devant la source lumineuse. L'enregistrement du compteur mesure la période.

Le quatrième passage à l'équilibre produit le déclanchement du compteur et provoque après un léger retard la fermeture du volet devant la cellule.



Le cinquième passage à l'équilibre, comme le deuxième ne produit rien.

Le sixième passage à l'équilibre arrête le compteur qui enregistre alors une grandeur mesurant quatre fois l'amplitude, et provoque avec retard un changement de commutation dans l'alimentation du compteur qui à nouveau reçoit le 100 000 étalon.

Après ce sixième passage à l'équilibre nous nous retrouvons dans les mêmes conditions qui précèdent le premier passage. Le cycle est donc terminé.

En examinant ce cycle nous voyons que la commutation et la commande du volet doivent être produites toutes les deux impulsions. La conception des circuits électroniques reposera donc sur l'utilisation de circuit de comptage. (bascule bistable).

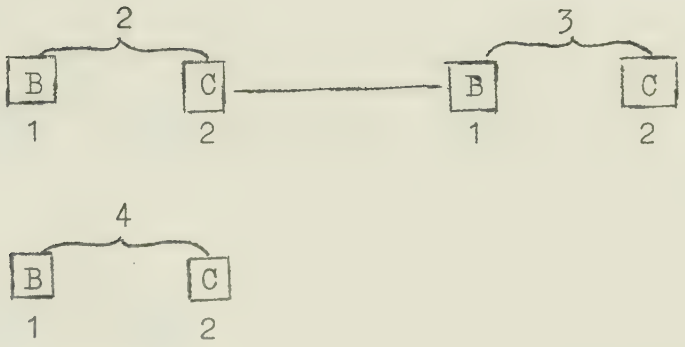
Nous avons représenté ci-contre le schéma bloc donnant les différents éléments du circuit et indiquant le rôle de ces derniers. Nous pouvons y distinguer trois parties principales correspondant aux trois fonctions de ce circuit :

- Déclenchement et arrêt du compteur (partie inférieure)
- Commutation du 100 000 ou des impulsions provenant du défilement des fentes (partie médiane)
- Commande du volet d'obturation de la cellule (partie supérieure)

Nous allons examiner brièvement le fonctionnement de cet ensemble.

Nous représenterons l'état des deux tubes composant les bascules bistables par le symbole [B] s'il s'agit d'un tube bloqué et [C] si au contraire le tube conduit. Le numéro au dessus indique le numéro de la bascule envisagée.

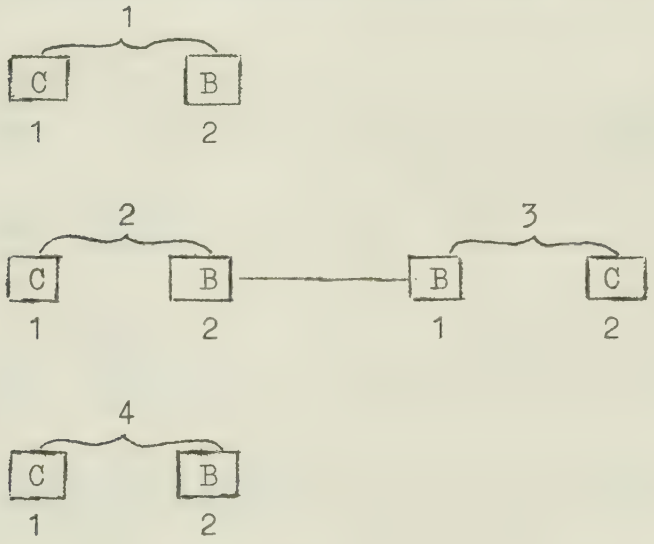
Avant de recevoir la première impulsion, nous mettons grâce à un "reset" toutes les bascules dans un état déterminé qui est le suivant



La bascule N° 3 est commandée par le tube 2 de la bascule N° 2, c'est-à-dire qu'elle changera d'état uniquement quand le tube 2 de la bascule N° 2 passera de B à C .

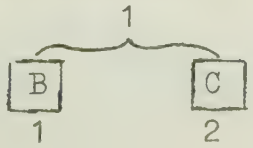
Le tube 1 de la bascule N° 4 commande la bascule monostable. Par suite le volet obturera la cellule (pendant un temps qu'on pourra régler en modifiant la constante de temps du monostable) quand le tube 1 passera de B à C .

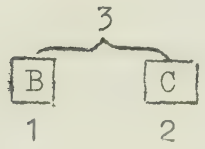
Après la première impulsion l'état est le suivant :



Le changement d'état de la bascule N° 1 a entrainé le déclenchement du compteur. Celui de la bascule N° 4 a provoqué la commande de l'obturation de la cellule. Quant à celui de la bascule N° 2 il n'a pas produit celui de la bascule N° 3 et par suite n'a pas entrainé un changement de commutation.

Après la deuxième impulsion (troisième passage par la position d'équilibre) nous avons la représentation suivante :

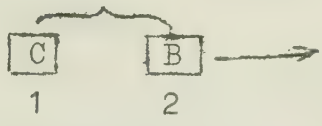




Le changement d'état de la bascule N° 1 produit l'arrêt du compteur. Celui de la bascule N° 2 entraine celui de la bascule N° 3 et par suite la fermeture de la "porte" du 100 000 étalon et l'ouverture de l'autre "porte".

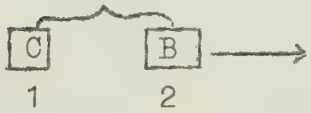
Le changement d'état de la bascule N° 4 n'entraine pas la commande de la bascule monostable, et le volet d'obturation reste ouvert.

Après la troisième impulsion (4ème passage par la position d'équilibre)



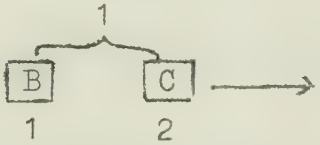
déclenchement du compteur (qui compte maintenant les impulsions provenant du défilement des fentes

Rien



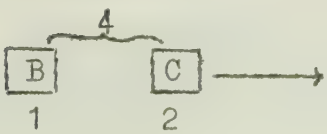
commande de l'obturateur

Après la quatrième impulsion (6ème passage par la position d'équilibre)



arrêt du compteur

Changement de commutation



rien

Nous retrouvons un état identique à celui qui précède la première impulsion, conformément à ce que nous nous étions fixé, le cycle est complet, et peut être parcouru de nouveau jusqu'à l'amortissement complet du pendule.

2-3/ Réalisation

Les dimensions inusitées du chassis surprendront. C'est une réalisation expérimentale, et nous avons cherché avant tout la facilité d'accès à tous les éléments, tout cela aidant grandement la mise au point. L'utilisation de transistors, outre un encombrement moindre, éviterait de véhiculer un courant voisin de 10 ampères (efficace) pour le chauffage. Nous y avons songé, mais notre trop grande inexpérience dans ce domaine aurait sans doute retardé la réalisation de cet appareil. Lorsque j'ai été mis au courant de la commande d'un compteur à enregistreur (fin juin 63) j'ai pensé que cet instrument de mesure pourrait me rendre de grands services, et la solution d'enregistrement automatique à pris corps dans mon esprit. Nous en avons débattu avec Monsieur MESNAGE qui me demanda de faire tout mon possible pour que l'appareil soit prêt à la fin de l'année scolaire 63. Ce délai pouvait être tenu à la seule condition que je me cantonne dans un domaine où mes études précédentes m'avaient donné une certaine expérience, celui des tubes et en particulier celui des circuits de commutation. Mais je pense qu'il est souhaitable de prévoir pour une prochaine étude l'utilisation de transistors.

Dans ce qui suit nous présenterons en premier lieu la description complète du circuit utilisé, mais sans entrer dans les détails, nous limitant à donner quelques indications pour la bonne compréhension du schéma.

En second lieu nous rendons compte des réalisations mécaniques et optiques (pour la mesure de l'amplitude), et des projets non encore réalisés : utilisation d'un photo-multiplicateur avec un système optique permettant une meilleure utilisation du miroir de Poggendorf et l'obtention d'une impulsion lumineuse rapide.

2-4/ Circuits électroniques

Les circuits produisant les impulsions, cellule ou photo-multiplicateur, ainsi que leurs éléments de liaison seront étudiés à part.

2-41) Circuit de commande du compteur

Le circuit qui précède la bascule de Schmitt est un inverseur permettant l'utilisation d'impulsion négative ou positive.

Pour commander la bascule de Schmitt il faut en effet une impulsion positive. Nous avons pensé qu'il était utile de prévoir un système permettant l'utilisation d'impulsions de l'une ou l'autre

polarité. Dans le cas d'impulsions positives la bascule est attaquée directement par ces dernieres,dans le cas d'impulsions négatives, le changement de polarité est réalisé à l'aide d'un circuit que l'on désigne par le nom "d'anode follower" et qui réalise une contre réaction de tension avec pour résultat un gain égal à -1. Nous avons ainsi une impédance de sortie faible, une bande passante importante, une bonne stabilité, et la possibilité de faire varier la hauteur du signal dans un domaine important sans entrainer de surcharge du tube ni de déformation dans la réponse. L'utilisation d'un interrupteur double permet de mettre ce montage hors-circuit quand on utilise des impulsions positives.

Pour la bascule de Schmitt après de nombreux essais, nous avons adopté l'emploi des pentodes et de résistances bobinées qui si elles augmentent le volume du montage, assurent une meilleure stabilité du seuil de déclenchement (cette remarque restera valable pour des circuits transistorisés). La bascule de Schmitt est l'élément le plus important de ce montage, c'est d'elle que dépendra la précision de la commande du compteur, et par suite c'est ce circuit qui demande le plus de soin dans sa réalisation. Le seuil ne doit pas dériver, et quelque soit la hauteur et la forme de l'impulsion, il ne doit pas y avoir de tendances à l'accrochage.

Ce n'est pas par goût de l'anachronisme que j'ai retenu pour le montage de la bascule de Schmitt deux 6 AC 7. Ces tubes pour des résistances internes à peu près équivalentes, ont une meilleure pente que les 6 AM 6 (série sécurité) et elles résistent mieux à une H.T de 300 volts appliquée sur leur écran. (un diviseur de tension outre une complication supplémentaire, ayant un rôle néfaste sur la reponse de la bascule). Nous avons, pour le circuit de mise en forme des impulsions provenant des fentes lumineuses, utilisé des 6 AM 6S. Elles travaillent dans des conditions "dures" et probablement que leur durée de vie sera abrégée.

Le seuil de déclenchement peut être réglé de 4 volts à 100 volts. Par la diminution de la valeur de la résistance variable de 22 000 on peut abaisser la limite inférieur de la commande, mais alors le point de réglage est plus critique et par suite ne saurait être conseillé pour des mesures précises.

La hauteur du signal positif délivré par la bascule est voisine de 40 volts.

Le circuit qui suit la bascule de Schmitt a un triple rôle :

1°) dériver le signal
2°) éliminer une des deux impulsions
3°) réaliser la liaison avec l'étage chargé de la commutation.

Il est constitué par une double triode 12 AU 7 dont les grilles et les cathodes sont respectivement reliées. Un pont divi-

seur donne un potentiel positif aux cathodes de telle façon que l'on soit au cut-off. A chaque impulsion, provenant de la bascule de Schmitt, correspondra sur chacune des plaques de la double triode une seule impulsion négative.

L'une de ces impulsions provoquera le changement d'état de la bascule bistable N° 1, l'autre celui de la bascule monostable (circuit retard) ce dernier ayant pour but d'assurer le changement de commutation, après l'arrêt du compteur (et non au même instant ce qui pourrait introduire des erreurs).

Les circuits qui composent les bascules bistables sont classiques. Pour éviter qu'entre le filament et la cathode des 6 ALS existe en permanence une tension voisine de 300 v nous avons réuni un côté de l'alimentation du chauffage des diodes à la haute tension. Faire très attention qua nd on réalise les connexions avec les alimentations. Le chauffage de ces diodes ne doit pas comporter de liaison avec la masse.

Pour le déclenchement ou l'arrêt du compteur il faut avoir une impulsion sur l'une des voies et rien sur l'autre. Le compteur "Hewlett Packar" peut être commandé par une impulsion positive ou une impulsion négative. Nous avons choisi une impulsion négative, car avec cette dernière nous pouvons aussi commander les compteurs Rochar que nous possédons à l'E.N.S.C.M.

La liaison entre le compteur et le bistable semble à première vue aisée à réaliser. Une simple double triode polarisée au cut-off (ou au-delà) attaquée par un circuit de dérivation, devrait convenir. En pratique, le temps de montée de l'impulsion délivrée par un tel montage n'est pas des meilleurs (voisin de 2 μs). Nous avons expérimenté plusieurs circuits. Celui représenté par le schéma nous a donné les meilleurs résultats. Le temps de monté de l'impulsion est de 0,2 μs, et sa hauteur 20 volts. Pour ces mesures nous avons utilisé le générateur d'impulsion Ribet en déclenchement manuel (pour déclencher la bascule de Schmitt), et le synchroscope Ribet (50 Mcs de bande passante) pour l'observation. La hauteur de l'impulsion peut être facilement augmentée, en substituant une charge anodique plus grande.

2-42) Circuit de commutation

Après cette description du circuit de commande du compteur examinons maintenant le circuit réalisant la commutation. A la suite du circuit retard se trouve un circuit analogue à celui qui suit la bascule de Schmitt. Par suite à chaque impulsion provenant de cette dernière, nous obtiendrons à chacune des plaques, après un retard voisin de 40 μs, une impulsion négative dont l'une commande le changement d'état du bistable N° 2 et l'autre celui du bistable N° 4. Le bistable N° 3 assure la commande des portes. Ces dernières sont réalisées par un circuit utilisant des tubes bi-grilles (de commande) E 91 H. L'une des grilles reçoit le signal à transmettre (100 000 étalon ou impulsions provenant du défilement des fentes), l'autre est polarisée par l'intermédiaire de la tension

plaque de la bascule bistable N° 3 et d'une tension négative. La tension de cette grille dépend donc de l'état de la bascule. Si le tube (de la bascule) relié à cette grille est bloqué la tension sur la grille permet l'amplification du signal. Si par contre le tube de la bascule conduit, la tension sur la grille est plus petite que le cut-off et par suite le signal se trouve bloqué. En théorie cela parait très simple, en pratique la mise au point s'est avérée délicate.

En premier lieu nous avons remarqué que même pour une polarisation négative de grille très importante pour un emploi normal du tube, le signal passe, l'amplitude est faible mais elle ne saurait être tenue pour négligeable devant la sensibilité de certains compteurs. Nous avons été conduits à sous-alimenter l'écran (40 v) et à employer une alimentation de plaque voisine de 100 v.

Nous avons été aussi fortement genés par le couplage qui se produisait par la haute-tension, pour les impulsions de longues durées (très basses-fréquences) provenant des fentes. (Au moment de l'amplitude maximum la masse pendulaire marque un temps d'arrêt. Au voisinage de cette position les impulsions sont donc longues). Par la suite nous avons appris que le compteur Hewlett avait pour limite en basse-fréquence 10 cycles, ce qui nous a conduit à réaliser un circuit de mise en forme des impulsions provenant du défilement des fentes. Nous en donnons le schéma séparément. Les impulsions ont toutes alors une durée analogue voisine de 40 μ s (ce qui élimine les couplages). Nous avons parlé précédemment de ce circuit qui est conçu de la façon suivante : Nous commandons en régime continu une bascule de Schmitt. Après dérivation et élimination d'une impulsion nous commandons une bascule monostable. Chaque impulsion positive délivrée par la cellule donnera donc une impulsion positive dont la durée dépendra de la constante de temps du monostable (ici la durée est de 40 μ s). Pour la bascule de Schmitt nous utilisons 2 6AM6S, les écrans sont alimentés directement par la H.T (300 v) c'est-à-dire juste à la limite prescrite par le constructeur. Le tube qui conduit est celui dont la grille est reliée à la plaque de la 12 AU 7 qui réalise la liaison avec la cathode follower (EF 86). Ce résultat est obtenu en réglant la résistance variable de la cathode de la 12 AU 7.

Revenons maintenant à notre circuit porte proprement dit. La polarisation négative doit être réglée à la limite du courant grille lorsque le tube conduit (-35 volts environ). En effet par suite de la liaison continue entre le bistable 2 et le bistable 3, tout changement d'état de 2 se traduit soit par un changement d'état de 3, soit par une légère variation de la tension plaque. Cette variation influera sur la polarisation de la grille et par suite sur l'amplification. Pour obtenir un signal de sortie, stable en amplitude, il est donc nécessaire de réaliser le réglage dont nous avons parlé précédemment.

La liaison avec le compteur se fait à l'aide d'une double triode 12 AU 7 montée en cathode follower.

2-43) Circuit de commande du volet

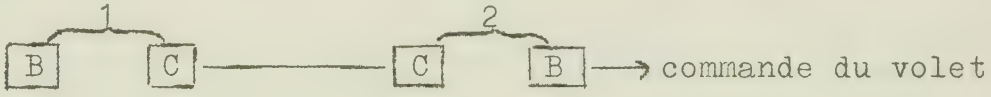
Nous donnerons simplement quelques précisions sur le monostable qui n'est pas du type le plus usuellement utilisé. Le volet doit rester fermé pendant un temps supérieur à la demi-période. Pour une période de l'ordre de 10 s, il faut donc que le monostable reste dans son état instable pendant un temps légèrement supérieur à 5 s. Le temps est mesuré grossièrement pour un montage usuel par 1/3 R.C., ce qui conduit à des valeurs de R et de C ne permettant guère le fonctionnement. Le montage adopté, résistance de fuite reliée à la masse plutôt qu'à la H.T donne pour temps de l'état instable 2 R.C. Pour des fortes valeurs de la capacité C il est bon de prévoir en série une résistance de quelques milliers d'ohms, ceci pour éviter un courant grille trop important.

Pour des périodes très longues de l'ordre de la minute ou plus on peut utiliser plusieurs monostables. Représentons par exemple l'état de deux monostables avant la première impulsion :

Le deuxième monostable basculera lorsque le tube 2 du premier passera de B à C .

La première impulsion provoquera le basculement du premier monostable sans entrainer celle du deuxième.

Au bout d'un certain temps le premier monostable reprendra son état d'équilibre ce qui entrainera le basculement du second monostable et la commande du volet.

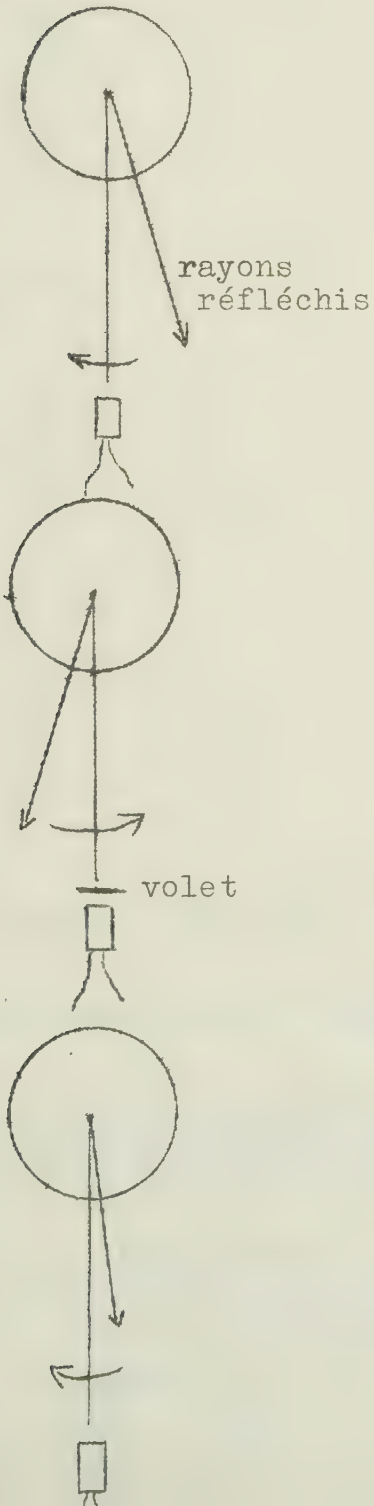


Le volet restera fermé jusqu'à ce que le second monostable reprenne son état d'équilibre.

Des états instables ayant une durée de 40 s sont facilement réalisables. Nous voyons donc qu'avec deux monostables nous pouvons utiliser ce système d'obturation pour des périodes allant jusqu'à 160 s c'est-à-dire 2 minutes 40 s. Le nombre de monostable que l'on peut monter en cascades n'étant pas limitatif, nous pourrons donc toujours réaliser l'occultation de la cellule, quelque soit la période.

En rédigeant je m'aperçois que moyennant l'utilisation de deux tubes supplémentaires il est possible d'améliorer la précision de la mesure de l'amplitude. Cette dernière est déterminée sur une période, c'est une valeur moyenne. Si il y a possibilité de la mesurer sur une demi-période, la valeur moyenne sera plus proche de la valeur réelle.

Reprenons les diverses séquences :



Au premier passage à l'équilibre, on doit déclencher le compteur qui est alimenté par du 100 000 étalon, et produire avec un léger retard la fermeture du volet devant la cellule.

Au deuxième passage il ne se produit rien.

Le troisième passage provoque l'arrêt du compteur, et le changement de commutation (avec retard).

Le quatrième passage devrait provoquer le déclenchement du compteur et la fermeture du volet. Supposons maintenant qu'on n'effectue pas la fermeture du volet.

Le cinquième produit alors l'arrêt du compteur dont l'indication mesure la valeur moyenne du double de l'amplitude, et le changement de commutation.

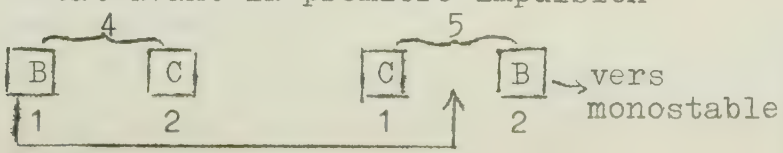
Si nous retrouvons alors les mêmes conditions qui précèdent la première impulsion, le cycle est complet.

Pour le changement de commutation il n'y a rien de changé, il doit se produire toutes les deux impulsions.

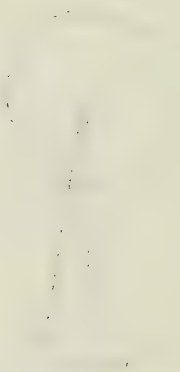
Pour la commande du volet, dans ces nouvelles séquences, elle doit se produire toutes les quatre impulsions soit 2^2, ce qui conduit à la mise en série de deux bascules bistables . Nous avons donc seulement à modifier le circuit de commande du volet.

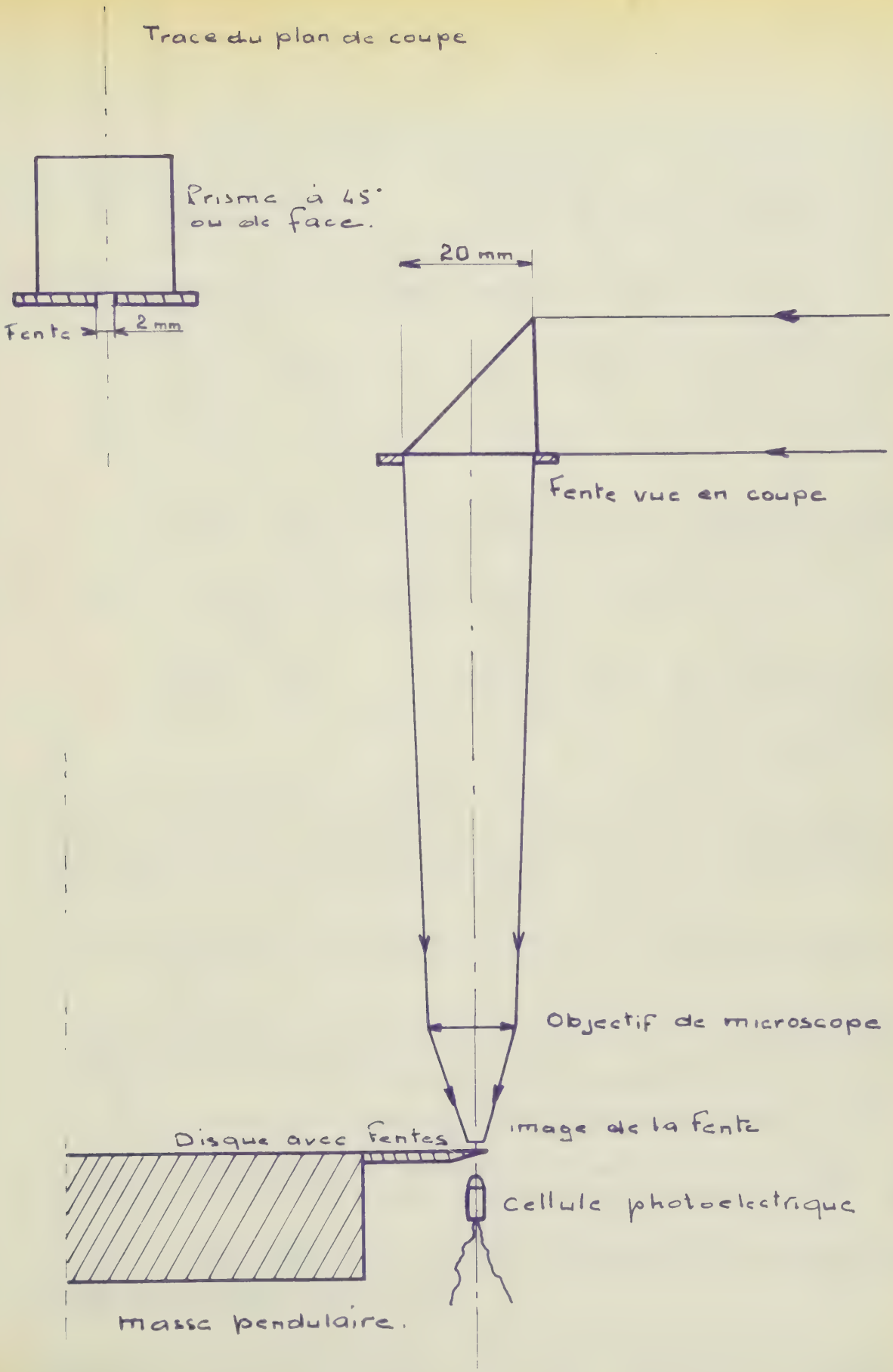
Nous donnons ci-après l'état pris par les tubes des bascules (du circuit de commande du volet) pour un cycle complet.

Etat avant la première impulsion



La commande du monostable et du bistable n° 5 a lieu pour le passage de B à C



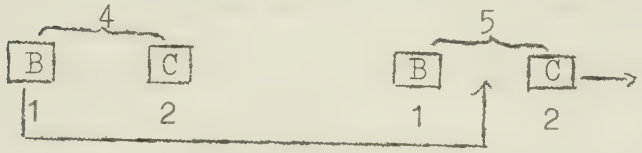

Trace du plan de coupe
Prisme à 45° ou de face.
Fente
2 mm
20 mm
Fente vue en coupe
Objectif de microscope
image de la fente
Disque avec fentes
Cellule photoélectrique
masse pendulaire.

OAP 12

Après la première impulsion (1er passage à l'équilibre)

le volet est fermé, le compteur compte le 100 000 étalon

Après la deuxième impulsion (3ème passage à l'équilibre)



le compteur est arreté (mesure de la période) le changement de commutation a été effectué.

Après la troisième impulsion (4ème passage à l'équilibre)

le compteur compte les fentes qui défilent devant la cellule.

Après la quatrième impulsion (5ème passage à l'équilibre)

le compteur arreté indique une grandeur mesurant le double de l'amplitude, le changement de commutation s'est effectué.

Nous nous retrouvons dans les mêmes conditions qui précèdent la première impulsion. Le cycle peut donc être répété jusqu'à l'amortissement du pendule. La période est mesurée dans un sens, puis dans un autre alternativement. La cellule devra donc être rigoureusement placée à la position d'équilibre.

2-44) Description du système optique utilisé pour l'éclairage des fentes.

L'image lumineuse qui éclaire les fentes doit avoir pour largeur maximum 0,3 mm. Nous l'obtiendrons à partir d'une fente ayant pour dimensions 20 mm sur 2 mm, et d'un objectif de microscope (Nachet) de grandissement 8. Nous avons alors une image (fente) de $\frac{2}{8}$ = 0,25 mm de large et de 2,5 mm de long. Voir schéma ci contre

A la sortie du cathode follower de liaison nous obtenons des impulsions, d'amplitude voisine de 10 volts.

2-5/ Etude et projet concernant les impulsions lumineuses pour la commande du compteur

Dans nos critiques des expériences précédentes nous avons signalé le rôle joué par la forme des impulsions lumineuses , et la précision était d'autant meilleure que le flanc de ces dernières est plus raide.

Le système qui produit ces impulsions étant lié à la masse pendulaire, la durée τ de ces impulsions sera fonction de la vitesse angulaire.

L'équation du mouvement étant $I\theta'' + f\theta' + C\theta = 0$ nous avons une solution de la forme $\theta = \theta_0 \sin(\omega t + \psi)$ θ désignant l'amplitude à l'instant t et θ_0 l'amplitude initiale.

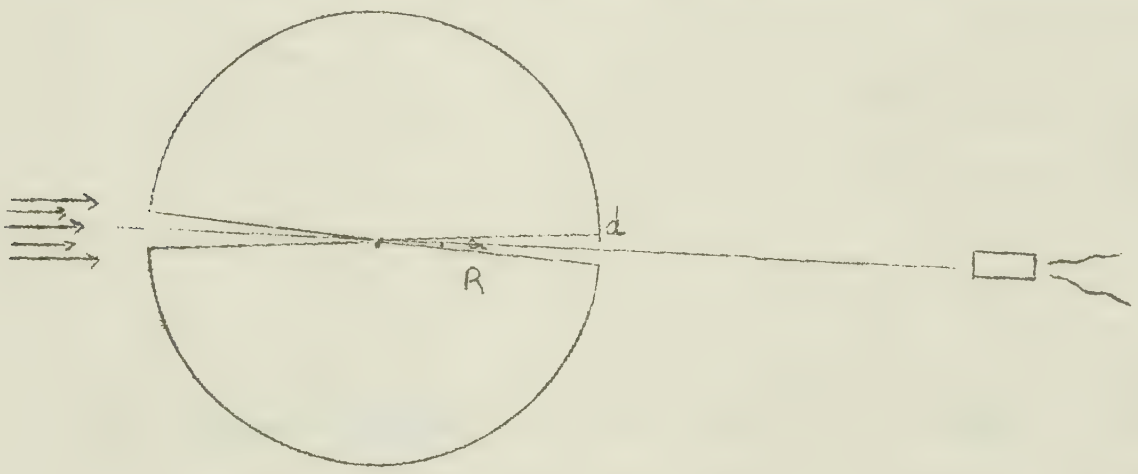
$$\theta' = \omega \theta_0 \cos(\omega t + \varphi) = \frac{2\pi}{T} \theta_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

au passage à l'équilibre :

$$\theta' = \frac{2\pi}{T} \theta_0$$

Nous allons examiner maintenant <u>les durées d'impulsion</u> obtenues pour les différents systèmes utilisables.

2-51) <u>Alignement de deux trous</u> (expériences de Monsieur ALTENBURGER



Nous considérons pour simplifier un éclairage parallèle. α mesure l'angle pendant lequel la cellule est éclairée. Si R désigne le rayon du cylindre et d le diamètre du trou

$$\alpha \approx \frac{d}{R}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi}{T} \theta_0 \quad \text{au passage à l'équilibre}$$

d'où pour la durée de l'impulsion :

$$\tau \approx \frac{\alpha T}{2\pi\theta_0} \approx \frac{d.T}{2\pi R\theta_0}$$

$$\boxed{\tau \approx \frac{d.T}{2\pi R\theta_0}}$$

Application numérique

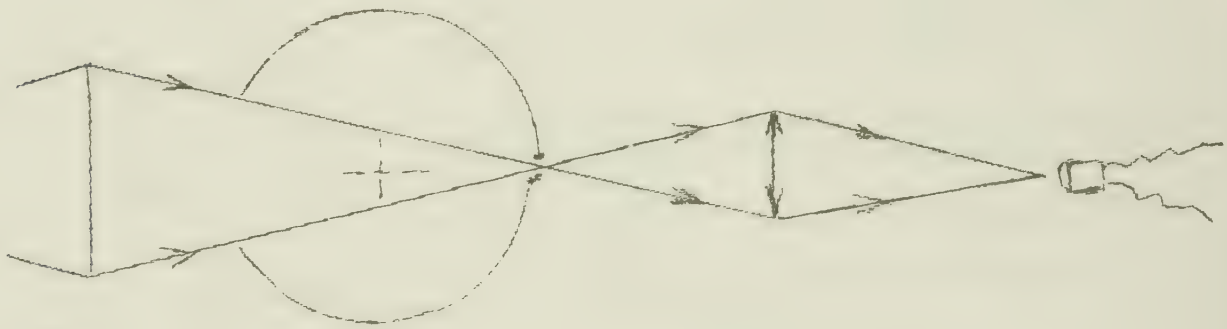
Le cylindre utilisé par Monsieur ALTENBURGER avait un rayon de 40 mm et les trous avaient un diamètre de 6 mm. Le diamètre des trous doit être supérieur à une certaine limite (voisine de 1 mm), car il ne faut pas oublier que le fil de torsion se trouve sur le trajet des rayons lumineux et par suite arrête ces derniers. Calculons la durée τ de l'impulsion pour une amplitude θ_o de 1 radian et une période de 5 secondes.

$R = 40$ mm
$d = 6$ mm
$\theta_o = 1$ radian
$T = 5$ secondes

$$\tau = \frac{6,5}{2\pi 40} = \frac{3}{8\pi} = 0,12 \text{ seconde}$$

$$\boxed{\tau = 0,12 \text{ s}}$$

2-52) Utilisation d'une fente



Supposons que la largeur de la fente d et de la largeur a de l'image projetée sur cette fente soir la même $a = d$.

La vitesse à la périphérie du cylindre au passage à l'équilibre est :

$$v = \frac{2\pi\ \theta_o\ R}{T}$$

et le temps de durée de l'impulsion pour $a = d$

$$\tau = \frac{T.2d}{2\pi\ \theta_o R} = \frac{T\ d}{\pi\theta_o R}$$

$$\boxed{\tau = \frac{T.d}{\pi\ \theta_o\ R}}$$

Application numérique

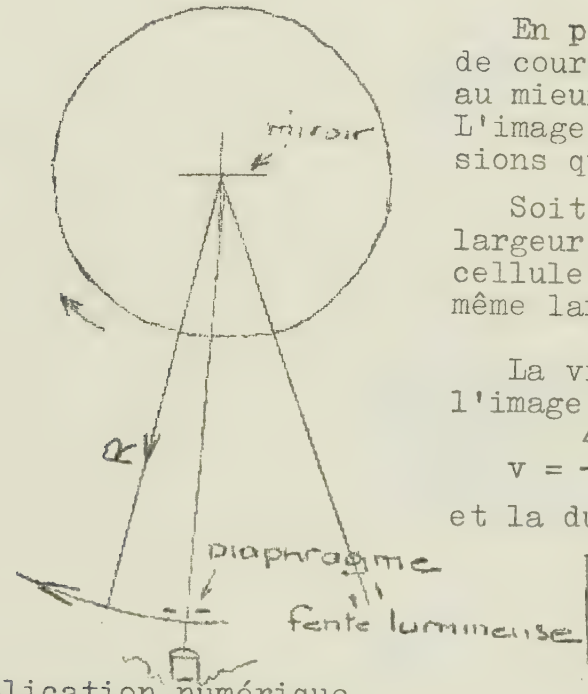
$d = a = 0,3$ mm
$R = 40$ mm
$\theta_o = 1$ radian
$T = 5$ secondes

$$\tau = \frac{5.0,3}{\pi.40} \approx \frac{0,5}{40} = 0,012 \text{ s}$$

$$\boxed{\tau = 1,2\ 10^{-2} \text{ s}}$$

La durée est donc 10 fois plus petite qu'avec le système précédent. En utilisant un montage optique correcte on peut obtenir une impulsion, à la sortie de la cellule, d'amplitude aussi grande que celle donnée par la réalisation précédente.

2-53) Miroir de Poggendorf



En placant la source fente au centre de courbure du miroir, nous respectons au mieux les conditions de stigmatisme. L'image obtenue ainsi a les mêmes dimensions que l'objet.

Soit R le rayon de courbure, et d la largeur de la fente. Plaçons devant la cellule un diaphragme (fente) ayant la même largeur que la fente objet.

La vitesse linéaire de déplacement de l'image au passage à l'équilibre est :

$$v = \frac{4\pi\theta_o R}{T} \quad \text{(miroir tournant)}$$

et la durée de l'impulsion pour a = d

$$\boxed{\tau = \frac{T.d}{2\pi\theta_o R}}$$

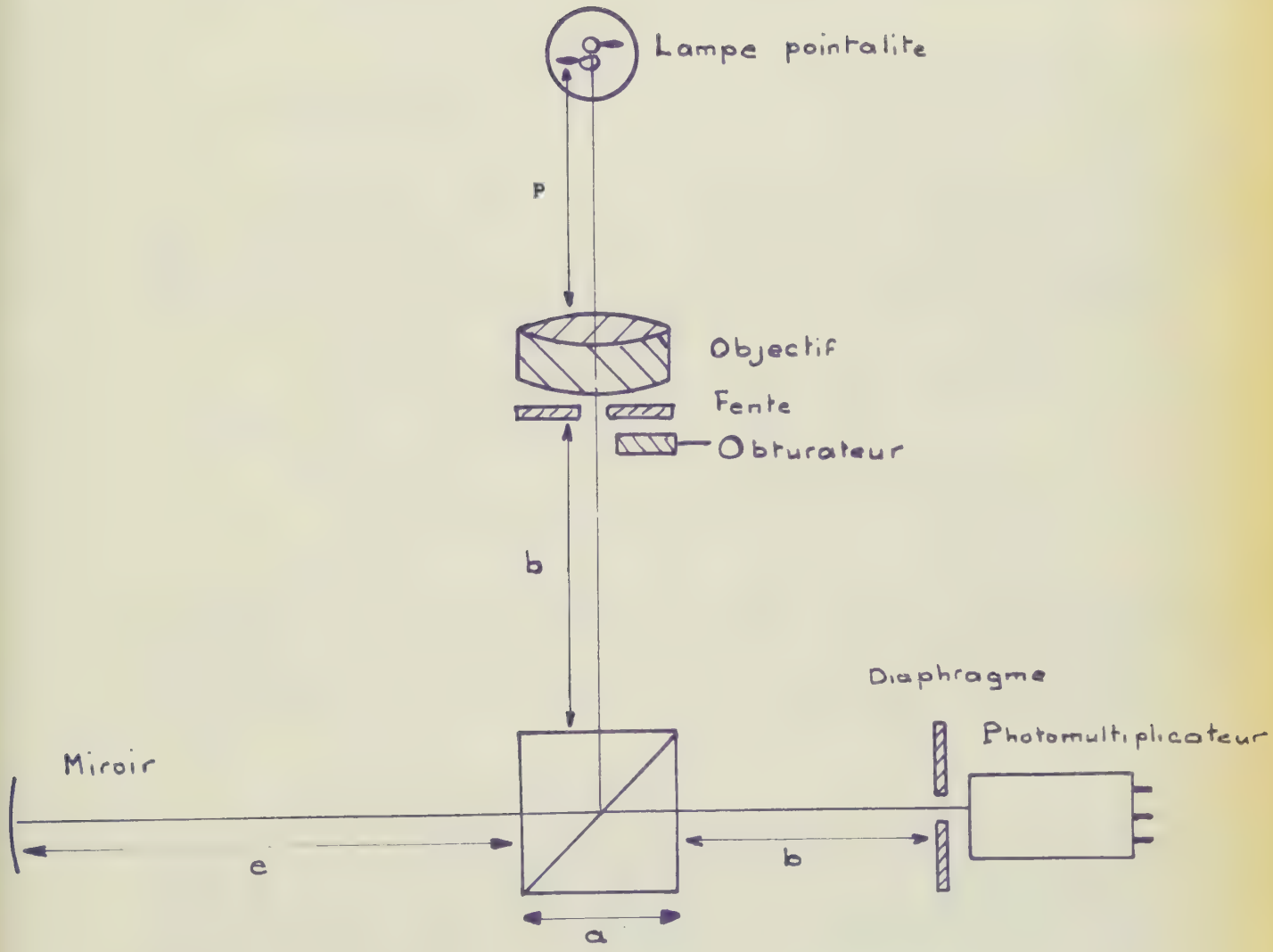
Application numérique

d = 0,3 mm
R = 1000 mm
θ_o = 1 radian
T = 5 s

$$\tau = \frac{5 \cdot 0,3}{2\pi \cdot 10^3} \approx 2,5\ 10^{-4} \text{ s}$$

$$\boxed{\tau = 2,5\ 10^{-4} \text{ s}}$$

La durée de l'impulsion lumineuse est très courte, mais l'énergie transmise est très faible. A la sortie de la photo diode l'amplitude a pour ordre de grandeur le 1/10 de volt ce qui conduit à l'utilisation d'une amplification voisine de 100. La réalisation d'un amplificateur à impulsion, stable, avec un bruit de fond faible n'est pas aisée. D'autant plus que la largeur des impulsions varie avec l'amplitude, ce qui donne des conditions contradictoires. Lors de la vérification de notre première réalisation, suite à nos premières expériences (se reporter aux pages 16 et suivantes) nous


Lampe pointalite
P
Objectif
Fente
Obturateur
b
Diaphragme
Photomultiplicateur
Miroir
e
b
a

n'avons pu déceler l'influence de l'amplification. Mais dans ce cas les impulsions lumineuses étaient à flancs raides (allumage d'une lampe à éclairs) de faible durée, et de largeur constante. Pour des impulsions de formes différentes il n'est pas assuré à priori que l'amplification ne joue aucun rôle.

L'emploi d'un photo-multiplicateur résoud d'une façon parfaite le problème (faible énergie de commande, très grande bande passante, très forte amplification). Depuis le début de ces travaux j'avais insisté sur les services qu'un tel matériel pouvait rendre. Mais le prix en avait fait différer l'achat. La maison PARRENIN, par suite d'un double emploi, nous en a cédé un d'occasion en Juin 1962. C'est le manque de temps qui ne m'a pas permis de l'utiliser pour la présentation de cette thèse. Je donne cependant la description du projet prévu.

2-6/ Description du système optique de production des impulsions lumineuses

Pour être dans les meilleures conditions de stigmatisme nous placerons la fente source dans un plan normal à l'axe du miroir, le centre de la fente coincidant avec le centre de courbure. Dans ce cas l'image et l'objet sont confondus. Pour les séparer nous utilisons un cube dont l'une des faces diagonales a été traitée (plan semi transparent), voir schéma ci-contre.

Pour obtenir un éclairement correct et le plus intense possible, deux conditions doivent être réalisées :

1°) L'objet doit être uniformément éclairé
2°) La pupille d'entrée doit être entièrement couverte par le faisceau éclairant.

Cela sera réalisé en utilisant un objectif ou un condenseur de préférence achromatique, en plaçant la fente objet juste à la sortie de ce dernier, et en choisissant les paramètres de telle façon que l'image de la surface éclairante (lampe à filament ou autre) donnée par l'objectif couvre entièrement la surface du miroir.

Calcul des paramètres

La distance de la fente au miroir b + a + c est fixée, c'est le rayon de courbure du miroir, soit R. La surface s de la source et la surface S du miroir sont déterminées. Comme le miroir est une portion de sphère, nous sommes conduits (pour respecter la condition 2) à utiliser comme surface éclairante une sphère, c'est-à-dire une lampe pointalite. Soit alors d'et d respectivement le diamètre de la sphère de la lampe pointalite, et le diamètre du miroir. Soit p la distance de la sphère éclairante à la lentille. Pour que l'image couvre entièrement le miroir il faut que :

$$\frac{d}{d'} = \frac{R}{p} \longrightarrow \boxed{p = \frac{R.d'}{d}}$$

d'autre part :

$$\frac{1}{R} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{p\,R}{p+R} = \frac{p}{1 + \frac{p}{R}} = \frac{R\ \frac{d'}{d}}{1 + \frac{d'}{d}} = \frac{R}{1 + \frac{d}{d'}}$$

$$\boxed{f = \frac{R}{1 + \frac{d}{d'}}}$$

Application numérique

$$\begin{cases} R \approx 10^3 \text{ mm} \\ d \approx 8 \text{ mm} \\ d' \approx 1 \text{ mm} \end{cases}$$ (Il existe deux modèles, l'un ayant un diamètre double de l'autre, soit voisin de 2 mm).

$$p \approx \frac{10^3}{8} = 125 \text{ mm}$$

$$f \approx \frac{10^3}{9} \approx 110 \text{ mm}$$

Les calculs précédents fixent seulement un ordre de grandeur, ils devront être repris en tenant compte des dimensions exactes des divers éléments.

La largeur de la fente pourra sans doute être choisie inférieure à 0,3 mm (ne pas oublier de noircir les faces pour éviter des réflexions parasites), et le diaphragme sera constitué par un trou ayant pour diamètre la largeur de la fente. (Si l'énergie de commande n'était pas suffisante, il faudrait utiliser une fente).

2-7/ Montage du photo-multiplicateur

Il ne présente pas de difficultés particulières. Le photo-multiplicateur devra être protégé de tout champ magnétique extérieur par un blindage en métal. Le pont diviseur sera monté directement sur le culot qui devra être un très bon isolant. La liaison avec les autres circuits se fera avec une cathode follower qui suivra directement le photo-multiplicateur.

Pour l'alimentation T.H.T on pourra se contenter (pour simplifier) d'une alimentation non stabilisée. Les variations de tension d'alimentation des dynodes se traduisent par des variation de l'amplitude des impulsions de sortie. A priori ces variations

doivent être faibles, et sans influence sur la commande du compteur. Il serait cependant utile de faire une compara-ison avec les résultats obtenus avec une alimentation stabilisée, (que l'on pourrait par exemple, emprunter à un autre laboratoire).

CHAPITRE III

3-1/ Utilisation de l'appareillage

Le but premier reste celui qui a motivé la mise en oeuvre de ces expériences, qui doivent confirmer ou infirmer la théorie proposée par Monsieur CHALEAT.

Nous avons indiqué très brièvement dans notre introduction, dans quel sens s'opèrent les modifications à la théorie classique de Saint-Venant ; nous invitons donc le lecteur intéressé par ces problèmes à se reporter à la communication de Monsieur CHALEAT publiée dans le Bulletin de la Société Suisse de Chronométrie (année 1957, p. 237 à 245). Ce mémoire contient une étude complète de l'influence des divers paramètres qui peuvent venir perturber la période d'un pendule de torsion (température, frottements visqueux de l'air, traction axiale, variation du module de Coulomb avec l'élongation) et donne en particulier l'ordre de grandeur du défaut d'isochronisme correspondant à ces divers facteurs.

Nous citons les relations donnant l'expression du couple, car elles nous serviront plus loin à discuter des possibilités de vérifications expérimentales.

Pour un fil rond :

$$C = \frac{\pi}{2} R^4 G \varphi \left[1 + \frac{3}{2} \frac{F}{\pi R^2 E} + \frac{R^2}{12} \frac{E}{G} \varphi^2 \right]$$

R rayon du fil de torsion
G module de Coulomb
$\varphi = \frac{\theta}{L}$ angle de torsion unitaire
F tension longitudinale du fil
E module d'Young

Pour un fil plat :

$$C = GI \varphi \left[1 + \frac{R^2 F}{3GI} + \frac{4}{45} \frac{eR^5}{I} \frac{E}{G} \varphi^2 \right]$$

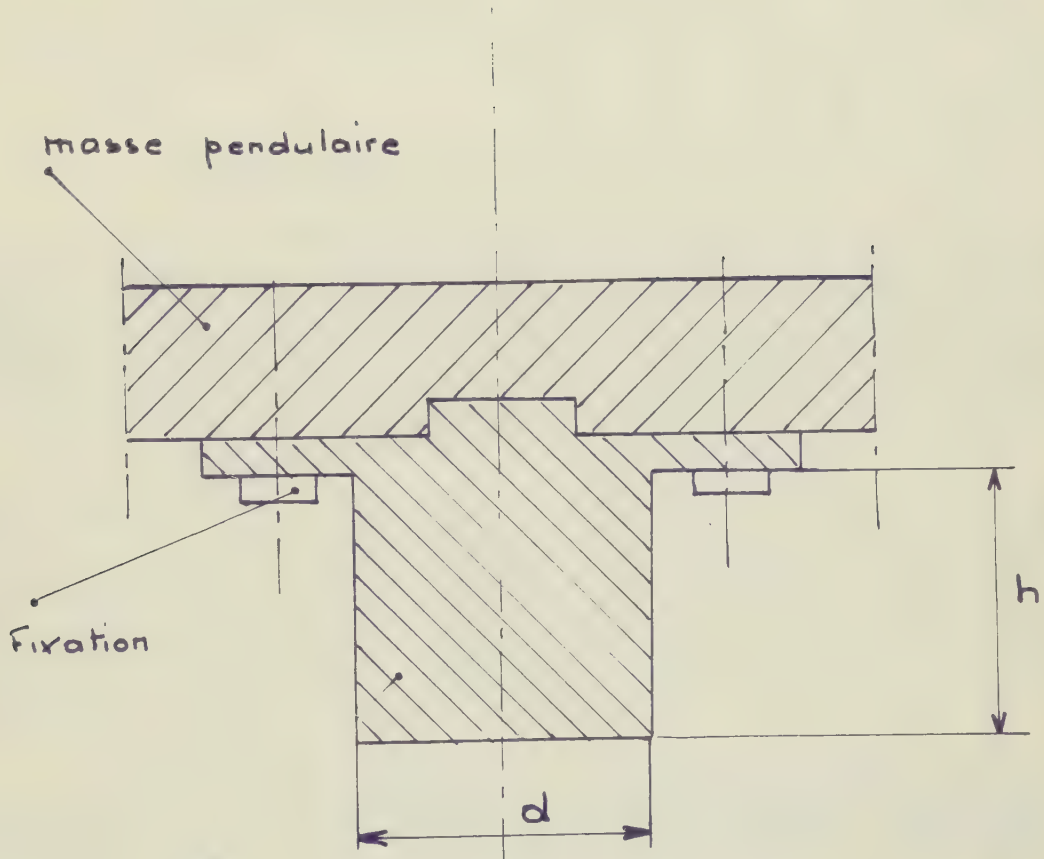
2R largeur du fil
e épaisseur du fil
I moment d'inertie à la torsion du fil

En différenciant il vient :

Pour le fil rond :

$$\frac{\Delta C}{C} \approx \frac{3}{2} \frac{\Delta F}{\pi R^2 E} \qquad \text{en prenant } \frac{G}{E} = \frac{2}{5}$$

$$\frac{\Delta C}{C} \approx \frac{3}{5} \frac{\Delta F}{\pi R^2 G}$$



Pour cette pièce les cotes h et d peuvent changer mais sont liees par une relation

Pour le fil plat :

$$\frac{\Delta C}{C} \approx \frac{\Delta F R^2}{3GI} \quad \text{avec } I \approx \frac{2}{3} Re^3 \text{ pour un fil très plat}$$

d'où : $\frac{\Delta C}{C} \approx \frac{\Delta F}{G} \left(\frac{R}{e}\right)^2 \frac{1}{2Re}$

Dans les expressions précédentes nous avons :

$\frac{F}{\sigma} = \pi R^2$ (fil rond) $\frac{F}{\sigma} = 2Re$ (fil plat)

σ étant la contrainte à l'extension.

d'où finalement : $\frac{\Delta C}{C} \approx \frac{3}{5} \frac{\Delta F}{F} \frac{\sigma}{G}$ (fil rond)

$\frac{\Delta C}{C} \approx \frac{\Delta F}{F} \left(\frac{R}{e}\right)^2 \frac{\sigma}{G}$ (fil plat)

3-2/ Vérifications expérimentales

Ces formules sont le résultat de certaines hypothèses, faites à priori. Intuitivement on peut penser qu'elles donneront des solutions assez proches de la réalité. Cependant les deuxièmes expériences de Monsieur JACQUEROD ont montré nettement que la période n'était pas une fonction analytique de l'amplitude et ne pouvait pas par conséquent être représentée par la relation :

$$T = T_o \quad (1 + \alpha \theta_o^2 + \beta \theta_o^4 + \ldots)$$

α et β étant des coefficients très petits devant l'unité. En effet si l'on se rapporte à ces travaux on voit que contrairement à ce qui était admis (intuitivement) la période pour les petites amplitudes varie considérablement, et se stabilise ensuite pour les grandes amplitudes. Avant d'envisager une nouvelle théorie ces résultats doivent être confirmés, et je pense que l'appareil présenté ici permettra de la faire.

En ce qui concerne la variation de période en fonction de la traction, ce problème semble très délicat à résoudre. Il faut, en effet, faire varier la tension axiale, sans modifier les autres paramètres. Pour un pendule constitué par une masse suspendue à un encastrement supérieur, il faut faire varier la masse sans changer le moment d'inertie. Cela est réalisable techniquement en substituant à la partie inférieure de la masse pendulaire et coaxialement avec l'axe du système, des cylindres ayant même moment d'inertie $I = 1/2\ MR^2$ mais de masse différente. Si p désigne la masse spécifique du métal employé pour la réalisation de ces cylindres, et h la hauteur, on a :

$$I = \frac{1}{2} \ p \ h \ \pi \ R^4 = \text{Constante}$$

$$\boxed{h = \frac{2K}{\pi . p . R^4}}$$

On ne peut guère espérer respecter les côtes à plus de 1/100 de mm.

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta h}{h} + 4\,\frac{\Delta R}{R}$$ si d désigne le diamètre (qui seul peut être mesuré avec précision).

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta h}{h} + 4\,\frac{\Delta d}{d}$$

ce qui entraine une variation de période

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2}\,\frac{AI}{I} = \frac{1}{2}\,\frac{\Delta h}{h} + 2\,\frac{\Delta d}{d}$$

Supposons pour fixer les idées que d = 50 mm et h = 10 mm

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2000} + \frac{1}{2500} = 9\,10^{-4} \approx 10^{-3}$$

$$\boxed{\frac{\Delta T}{T} = 10^{-3}}$$

Reprenons maintenant les relations donnant les variations de la période en fonction de la tension, voyons à quelle variation de tension correspond la variation de période calculée précédemment :

a) Pour le fil rond

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{3}{10}\,\frac{\Delta F}{F}\,\frac{\sigma}{G}$$

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{10}{3}\cdot\frac{G}{\sigma}\,\frac{\Delta T}{T}$$

En admettant comme Monsieur CHALEAT que $\frac{\sigma}{G} = 10^{-4}$ pour $\frac{\Delta T}{T} = 10^{-3}$ on trouve :

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{100}{3} \approx 30 \qquad \boxed{\frac{\Delta F}{F} = 30}$$

Avec une telle variation la limite élastique serait largement dépassée, par suite avec un fil rond il ne faut pas compter pouvoir vérifier expérimentalement la relation proposée.

b) Avec un fil plat

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2}\,\frac{\Delta F}{F}\,\left(\frac{R}{e}\right)^2\,\frac{\sigma}{G}$$

En prenant $\frac{R}{e} = 5$

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{20}{25} \approx 1 \qquad \boxed{\frac{\Delta F}{F} = 1}$$

La vérification ne pourra dans ce cas n'être que très grossière.

On peut certes, faire varier commodément la tension en utilisant comme oscillateur une masse fixée au milieu du fil de torsion et en appliquant à l'encastrement inférieur une force donnée. Mais dans ce cas le fil supérieur est soumis à la tension F à laquelle se superpose la tension due au poids de la masse pendulaire, tandis que le fil inférieur n'est soumis qu'à la tension F. Le poids de la masse n'étant pas en général négligeable devant F il faudra en tenir compte dans les relations.

L'utilisation d'un tel pendule (à deux encastrements) par Gérard LALLEMENT, pour ses études d'amortissement a conduit à des résultats non conformes à la théorie générale. Il faudra reprendre des mesures et déterminer en particulier l'influence de l'inclinaison par rapport à la verticale.

CONCLUSION :

Les conclusions que nous pouvons retirer de cette étude, présentent un caractère assez négatif. La période d'un oscillateur de torsion, pour des conditions initiales bien déterminées (amplitude, température, pression) était considérée par nous avant ces expériences, comme une constante. Les variations en fonction des divers paramètres étaient aussi considérées comme uniformes. Hors toutes les mesures réalisées jusqu'à ce jour à l'E.N.S.C.M tendent à prouver, que la période n'est définie qu'à 10^{-4} s près, et qu'elle présente des variations à caractère aléatoire autour de la valeur moyenne. Les courbes régulières obtenues par Monsieur JAQUEROD peuvent être expliquées par le fait que la méthode des coincidences ne donne qu'une valeur moyenne de la période pour une valeur moyenne de l'amplitude

Faut-il conclure à l'inutilité de la poursuite de telles recherches ? Je ne le pense pas. Des résultats demandent à être confirmés, des théories restent à vérifier, et de toute façon l'étude du comportement d'un fil à la torsion fournit de précieux renseignements.

B I B L I O G R A P H I E

P. ALTENBURGER : Travail de Diplôme Scientifique 1956. Influence de la traction axiale sur la période d'un pendule de torsion.

A. JAQUEROD : Les écarts à la loi de Hooke et leur importance en chronométrie. Bulletin de la Société Suisse de Chronométrie 1946 p. 309 et 1947 p. 399.

J. HAAG : Journal de Mathématiques pures et appliquées Tome XXV, fascicule 1, 1946.

R. CHALEAT : Etudes des déformations des fils élastiques circulaires. Annales Françaises de Chronométrie 20ème année, 2ème trimestre, 2ème série, tome IV.

G. LALLEMENT : Thèse d'ingénieur-docteur. Problème concernant le pendule de torsion (mai 1962).

RESISTANCES UTILISEES

Le premier chiffre indique la valeur, le deuxième la puissance.

A = Agglomérée B = Bobinée C = Carbone V = Résistance variable

R_1 = 500 K , $\frac{1}{2}$, C
R_2 = 1 M , $\frac{1}{2}$, C
R_3 = 500 K , $\frac{1}{2}$, C
R_4 = 10 K , 2 , B
R_5 = 5,7 K A
R_6 = 1 M , $\frac{1}{2}$, A
R_7 = 75 K , 2 , B
R_8 = 50 K , 4 , B V
R_9 = 1 K , $\frac{1}{2}$, A
R_{10} = 3,9 K , 1 , B
R_{11} = 100 K , 1 , B
R_{12} = 10 K , 2 , B
R_{13} = 4,7 K , 1 , B
R_{14} = 39 K , 2 , B
R_{15} = 22 K , 2 , B V
R_{16} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{17} = 20 K , 1 , B
R_{18} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{19} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{20} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{21} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{22} = 20 K , 2 , B
R_{23} = 200 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{24} = 10 K , 1 , C
R_{25} = 200 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{26} = 20 K , 2 , B
R_{27} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{28} = 50 K , 1 , C
R_{29} = 1 M , $\frac{1}{2}$, A
R_{30} = 2 M , $\frac{1}{2}$, A
R_{31} = 22 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{32} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{33} = 1 K , $\frac{1}{2}$, B
R_{34} = 15 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{35} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{36} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{37} = 1 M , $\frac{1}{2}$, A
R_{38} = 2 M , $\frac{1}{2}$, A
R_{39} = 22 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{40} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{41} = 1 K , $\frac{1}{2}$, B
R_{42} = 15 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{43} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C
R_{44} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{45} = 22 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{46} = 1 M , $\frac{1}{2}$, C

R_{47} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{48} = 220 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{49} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{50} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{51} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{52} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{53} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{54} = 22 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{55} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{56} = 47 K , 1 , C

R_{57} = 100 K , 1 , C

R_{58} = 15 K , 2 , B

R_{59} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{60} = 4,7 K , 1 , B

R_{61} = 220 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{62} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{63} = 15 K , 2 , B

R_{64} = 220 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{65} = 4,7 K , 1 , C

R_{66} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{67} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{68} = 20 K , 1 , B

R_{69} = 220 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{70} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{71} = 220 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{72} = 20 K , 1 , B

R_{73} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{74} = 3 M , $\frac{1}{2}$, C

R_{75} = 470 Ω , $\frac{1}{2}$, C

R_{76} = 500 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{77} = 500 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{78} = 4,7 K , 2 , B

R_{79} = 22 K , 3 , B

R_{80} = 47 K , 3 , B

R_{81} = 22 K , 3 , B V

R_{82} = 22 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{83} = 10 K , 3 , B

R_{84} = 22 K , 3 , B

R_{85} = 3 M , $\frac{1}{2}$, C

R_{86} = 1 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{87} = 4,7 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{88} = 500 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{89} = 4,7 K , 3 , B

R_{90} = 10 K , 3 , B

R_{91} = 500 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{92} = 22 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{93} = 22 K , 3 , B

R_{94} = 10 K , 3 , B

R_{95} = 500 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{96} = 500 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{97} = 10 K , 1 , B

R_{98} = 22 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{99} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{100} = 15 K , 2 , B

R_{101} = 4,7 K , 1 , B

R_{102} = 220 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{103} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{104} = 220 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{105} = 15 K , 2 , B

R_{106} = 4,7 K , 1 , B

R_{107} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{108} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{109} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{110} = 22 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{111} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{112} = 220 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{113} = 22 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{114} = 1 M , $\frac{1}{2}$, C

R_{115} = 5 M , $\frac{1}{2}$, A peut s'ajuster suivant la période de l'oscillateur mécanique

R_{116} = 100 K $\frac{1}{2}$, C

R_{117} = 47 K , 3 , B

R_{118} = 22 K , 3 , B.V

R_{119} = 3,3 K , $\frac{1}{2}$, A

R_{120} = 100 K , $\frac{1}{2}$, A

R_{121} = 1 M , $\frac{1}{2}$, C

R_{122} = 100 K , $\frac{1}{2}$, A

R_{123} = 10 K , 1 , B

R_{124} = 470 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{125} = 10 K , 2 , B.V

R_{126} = 50 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{127} = 1 K , $\frac{1}{4}$, A

R_{128} = 10 K , 1 , B

R_{129} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{130} = 10 K , 2 , B

R_{131} = 4,7 K , 2 , B

R_{132} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{133} = 15 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{134} = 22 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{135} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{136} = 100 K , 1 , C

R_{137} = 1 M , $\frac{1}{2}$, C

R_{138} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{139} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{140} = 10 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{141} = 47 K , $\frac{1}{2}$, C

R_{142} = 100 K , $\frac{1}{2}$, C

POTENTIOMETRES

P_1 = 50 K linéaire

P_2 = 1 M

CAPACITES

m = mica p = papier E = électrolytique
Sans spécification spéciale la tension de service est 500 V

C_1 = 0,01 µF , m
C_2 = 0,01 µF , p
C_3 = 0,01 µF , m
C_4 = 50 µF , E , 35 V
C_5 = 0,01 µF , m
C_6 = 20 pf , m
C_7 = 50 pf , m
C_8 = 500 pf , m
C_9 = 20 pf , m
C_{10} = 20 pf , m
C_{11} = 1000 pf , m
C_{12} = 100 pf , m
C_{13} = 1000 pf , m
C_{14} = 500 pf , m
C_{15} = 1000 pf , m
C_{16} = 100 pf , m
C_{17} = 1000 pf , m
C_{18} = 500 pf , m
C_{19} = 20 pf , m
C_{20} = 0,01 µF , m
C_{21} = 100 pf , m
C_{22} = 50 pf , m
C_{23} = 500 pf , m
C_{24} = 50 pf , m
C_{25} = 0,01 µF , p
C_{26} = 50 pf , m
C_{27} = 50 pf , m
C_{28} = 0,01 µF , p
C_{29} = 50 pf
C_{30} = 0,01 µF , p
C_{31} = 100 µF , E , 35 V
C_{32} = 32 µF , E , 400 V
C_{33} = 8 µF , E , 400 V
C_{34} = 50 µF , E , 35 V
C_{35} = 32 µF , E , 400 V
C_{36} = 8 µF , E , 400 V
C_{37} = 0,01 µF , p
C_{38} = 0,01 µF , p
C_{39} = n'existe pas
C_{40} = 50 pf , m
C_{41} = 50 pf , m
C_{42} = 0,01 µF , p
C_{43} = 1 µF, p { Peut s'ajuster suivant la période de l'oscillateur
C_{44} = 20 pf , m
C_{45} = 8 µF , E , 250 V
C_{46} = 20 pf , m
C_{47} = 50 pf , m
C_{48} = 500 pf , m
C_{49} = 20 pf , m
C_{50} = 0,01 µF , p
C_{51} = 100 pf , m C_{52} = 1000 pf , m

TUBES UTILISES

T_1 = 12 AU 7
T_2 = 6 AC 7
T_3 = 6 AC 7
T_4(a,b) = 12 AU 7
T_5 = 6 AL 5
T_6 = 12 AU 7
T_7 = 12 AU 7
T_8 = 12 AU 7
T_9 = 6 AL 5
T_{10} = 12 AU 7
T_{11} (a,b) = 12 AU 7
T_{12} = 6 AL 5
T_{13} = 12 AU 7
T_{14} = 6 AL 5
T_{15} = 12 AU 7
T_{16} = E 91 H
T_{17} = E 91 H
T_{18} = 12 AU 7
T_{19} = 6 AL 5
T_{20} = 12 AU 7
T_{21} = 6 AL 5
T_{22} = 12 AU 7
T_{23} = 12 AU 7
T_{24} = EF 86
T_{25} = 12 AU 7
T_{26} = 6 AM6 S
T_{27} = 6 AM6 S
T_{28} = 12 AU 7
T_{29} = 6 AL 5
T_{30} = 12 AU 7

CONSOMMATION POUR LE CHAUFFAGE DES FILAMENTS

Alimentation avec un côté à la masse

16	12 AU 7	16. 0,45	= 7,2 A
2	6 AC 7	2 . 0,45	= 0,9
2	E 91 H	2 . 0,45	= 0,9
2	6 AM 65	2 . 0,3	= 0,6
2	E F 86	2 . 0,2	= 0,4
			10,0 A

Alimentation avec un côté à la H T

7	6 AL 5	7 . 0,3	= 2,1 A

Consommation pour la H.T (300 V) 180 mA